

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Slavko Topić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović, dipl. ing.

Prof. dr. sc. Željko Tuković, dipl. ing.

Student:

Slavko Topić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojim roditeljima.

Slavko Topić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. TIPOVI KINETIČKIH VODNIH TURBINA..... | 3 |
| 2.1. Aksijalne vodne turbine | 3 |
| 2.2. Turbine s križnim protokom | 6 |
| 2.2.1. Turbine s vertikalnom osi | 8 |
| 2.2.1.1. Darrieusova turbina..... | 9 |
| 2.2.1.2. H-Darrieusova turbine | 9 |
| 2.2.1.3. Squirrel cage turbina | 11 |
| 2.2.1.4. Gorlovova turbina | 12 |
| 2.2.1.5. Savoniusova turbina..... | 12 |
| 2.3. Razlike u turbinama s obzirom na mjesto primjene..... | 13 |
| 2.4. Sustavi za iskorištavanje kinetičke energije vodenoga toka bez trbina | 15 |
| 3. NAČINI INSTALACIJE KINETIČKIH VODNIH TURBINA..... | 20 |
| 4. ODABIR LOKACIJE ZA POSTAVLJANJE KINETIČKE VODNE TURBINE..... | 23 |
| 4.1. ADCP metoda | 25 |
| 5. ODABIR VRSTE KINETIČKE VODNE TURBINE..... | 31 |
| 6. NASLOV POGLAVLJA | 34 |
| 7. PROVJERA STRUJNIH KARAKTERISTIKA | 41 |
| 7.1. Kavitacisko ograničenje | 44 |
| 8. UTJECAJ KINETIČKIH VODNIH TURBINA NA OKOLIŠ..... | 46 |
| 9. ZAKLJUČAK..... | 50 |
| LITERATURA..... | 51 |
| PRILOZI..... | 52 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Horizontalne hidroturbine | 4 |
| Slika 2. | SeaGen kinetička turbina..... | 5 |
| Slika 3. | OpenHydro kinetička turbina | 6 |
| Slika 4. | Vertikalne turbine | 7 |
| Slika 5. | Turbine s osi paralelnom s ravninom vode | 8 |
| Slika 6. | Darrieusovu turbinu..... | 9 |
| Slika 7. | EnCurrent H-Darrieusova turbina | 10 |
| Slika 8. | Distribucija sila i tlaka na H-Darrieusovu turbinu | 11 |
| Slika 9. | EnCurrent Squirrel cage Darrieusova turbina | 11 |
| Slika 10. | GHT Gorlovova turbina | 12 |
| Slika 11. | Savoniusova turbina | 13 |
| Slika 12. | OCPS | 16 |
| Slika 13. | EEL..... | 17 |
| Slika 14. | VIVACE..... | 17 |
| Slika 15. | Seasnail..... | 18 |
| Slika 16. | Tidal Sails..... | 19 |
| Slika 17. | Pričvršćivanje na morsko ili riječno dno gravitacijom..... | 20 |
| Slika 18. | Turbine postavljene na stupu..... | 21 |
| Slika 19. | Plutajuće turbine..... | 22 |
| Slika 20. | Vodenica na rijeci Dravi pored Podravske Sesvete | 23 |
| Slika 21. | Mjerenje protoka korištenjem ADCP metode | 26 |
| Slika 22. | Površina kanala rijeke Drave..... | 27 |
| Slika 23. | Ovisnost brzine i dubine o udaljenosti od obale | 28 |
| Slika 24. | Ovisnost protoka o mjesecu u godini | 30 |
| Slika 25. | Alternative Hydro solutions Darrieusova turbina | 31 |
| Slika 26. | Lopatica Alternative Hydro solutions | 32 |
| Slika 27. | Ovisnost izlazne snage pojedinih modela Alternative Hydro solutions turbina o brzini vodenog toka | 33 |
| Slika 28. | Kinetička energija vodenog toka | 35 |
| Slika 29. | Model rotirajućeg diska kinetičke vodne turbine | 35 |
| Slika 30. | Promjena koeficijenta korisnosti s promjenom koeficijenta brzohodnosti | 38 |
| Slika 31. | Koeficijenti snage Darrieus Savonius tipa turbine | 38 |
| Slika 32. | Odnos između koeficijenta snage i TSR-a of H-Darrieus turbine..... | 39 |
| Slika 33. | Koeficijenti snage vertikalne vjetroturbine | 39 |
| Slika 34. | Polje brzine prilikom prolaska vode kroz Darrieusovu turbinu s tri lopatice | 44 |
| Slika 35. | Pojava kavitacije na lopaticama | 47 |
| Slika 36. | Utjecaj smičnog napreznja na ribe | 48 |
| Slika 37. | Slika 35. Posljedice udara lopaticom | 48 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Vremenska ovisnost protoka i vodostaja..... | 29 |
|--|----|

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------------|-------------------|--|
| P_0 | W | Snaga na turbini |
| ρ | kg/m ³ | Gustoća vode |
| A_1 | m ² | Površina rotora |
| U_0 | m/s | Brzina vode na ulazu u kontrolni volumen |
| \dot{m} | kg/s | Maseni protok |
| U_1 | kg/s | Brzina vode ispred rotora |
| U_2 | kg/s | Brzina vode iza rotora |
| U_3 | kg/s | Brzina vode na izlazu iz kontrolnog volumena |
| p_0 | Pa | Tlak izvan kontrolnog volumena |
| p_1 | Pa | Tlak ispred rotora |
| p_2 | Pa | Tlak iza rotora |
| C_P | | Koeficijent snage |
| f_D | Hz | Doppleov pomak frekvencije |
| f_s | Hz | Frekvencija zvuka |
| v_r | m/s | Relativna brzina gibanja izvora zvuka |
| c | m/s | Brzina zvuka |
| v_r | m/s | Relativna brzina fluida |
| $\overline{\tau}_r$ | N/mm | Tenzor smicanja |
| \vec{F} | N | Sila |
| t | s | Vrijeme |
| μ | Pa·s | Lokalna dinamička viskoznost |
| μ_t | Pa·s | Viskoznost turbulencije |
| k | J | Kinetička energija turbulencije |
| ε | J | Disipacija energije turbulencije |
| R | m | Vanjski radius |
| r | m | Lokalni radius |
| C_{Pmin} | | Koeficijent minimalnog lokalnog tlaka |
| ρ_m | kg/m ³ | Gustoća mješavine |
| σ | | Bezdimenziski kavitacijski broj |
| $V_{cavitate}$ | m/s | Brzina pri kojoj dolazi do kavitacije |
| V_{loc} | m/s | Lokalna brzina vode |

SAŽETAK

U ovome radu biti će dan pregled tehnologija kinetičkih vodnih turbina. Kinetičke turbine se koriste za proizvodnju električne energije direktno iz toka vode u rijekama, potocima, kanalima. Kod kinetičkih hidroelektrana nije potrebna izgradnja brana. Ista tehnologija kao i kod kinetičkih elektrana koje pogoni tok vode u rijekama se koristi i za proizvodnju električne energije iz snage morskih struja.

Proizvodnja električne energije iz malih kinetičkih hidroelektrana smatra se pouzdanom i ekološki prihvatljivom. Navedena obilježja su u današnje vrijeme izuzetno važna pri proizvodnji električne energije. Zbog niske cijene proizvodnje i relativno jednostavne konstrukcije malih kinetičkih turbina koje koriste tokove rijeka za proizvodnju električne energije, i manje razvijene zemlje se mogu uključiti u njihovu proizvodnju. To bi dalo mogućnost opskrbljivanja električnom energijom i manjih izoliranih zajednica.

Ključne riječi: kinetičke vodne turbine, hidrokinetička energija

SUMMARY

In this paper a technology overview of kinetic waterturbines will be given. Kinetic waterturbines are being used to produce electricity directly from water flow in rivers, streams, channels. Kinetic hydropower plants do not require the construction of dams. The same technology as in the kinetic hydropower plants that are driven by the flow of water in rivers is also used to produce electricity from the power of sea currents.

Electricity production from small kinetic hydropower plants is considered reliable and environmentally friendly. Those characteristics are nowadays extremely important in the production of electricity. Due to the low cost of production and relatively simple construction of small kinetic turbines that use the river flows to produce electricity, less developed countries may be included in their production as well. . It would give the possibility of supplying electricity even to small isolated communities.

Key words: kinetic water turbines, hydro-kinetic energy

1. UVOD

Brzim rastom ljudske populacije, razvojem i porastom potražnje u nerazvijenim zemljama, te porastom potrošnje cjelokupnog čovječanstva svakim danom rastu zahtjevi za energijom. Većina energije koja se danas koristi dolazi iz fosilnih goriva, a njihova količina je ograničena te se iz dana u dan smanjuje. Najvažni problemi današnjice su osiguravanje održivog stanja okoliša, te ostavljanje sljedećim generacijama čistog okoliša u kojem će i oni moći živjeti, sve navedeno je prihvatljivo za sve zainteresirane grupe. Kao što se zna, korištenje fosilnih goriva uzrokuje onečišćenje okoliša, efekt staklenika i emisiju CO₂. Kako bi se to izbjelo, potrebno je korištenje alternativnih izvora energije. Idealni izvor energije trebao bi biti obnovljiv te bi trebao imati minimalan negativan utjecaj na okoliš. Obnovljivi izvori energije su ključni za osiguravanje proizvodnje obnovljive električne energije u budućnosti. Hidro energija i energija vjetra smatraju se optimalnim izborom između danas dostupnih obnovljivih izvora energije. [1]

Prirodni tokovi rijeka i potoka, te gibanja mora istražuju se već dugi niz godina u svrhu proizvodnje električne energije, a u posljednje vrijeme raste interes za njima u mnogim dijelovima svijeta. Tehnologije proizvodnje električne energije iz malih kinetičkih hidroelektrana su raznolike. U tu svrhu su razvijeni i testirani različiti koncepti, među kojima su horizontalne i vertikalne turbine najuobičajenije. [2]

Proces pretvorbe kinetičke energije vode podrazumijeva iskorištavanje kinetičke energije koja se nalazi u riječnim tokovima, morskim strujama ili nekim drugim vodnim tokovima koje je čovjek izgradio za proizvodnju električne energije. Ova vrsta tehnologije obnovljivih izvora energije koja postaje sve više prisutna prepoznata je kao jedinstveno i nekonvencionalno rješenje koje pripada kako u područja kopnenih vodnih resursa tako i u područje enerije mora. U usporedbi s konvencionalnim hidroelektranama, gdje je potrebno na umjetan način korištenjem brana ostvariti potrebnu hidrostatsku visunu vodnog stupca (kako za velike tako i za male hidroelektrane), kinetičke hidroelektrane se konstruiraju na način da značajno ne mijenjaju prirodno kretanje toka rijeke. Što se tiče korištenje snage mora za pridobivanje električne energije ova tehnologija se može koristiti tako da se na jednom području postavi veći broj međusobno povezanih turbina koje bi energiju pridobivale iz morskih struja i morskih mijena, za razliku od brana za morske mijene gdje se koristi potencijalna nergija bazena. Uz privlačne karakteristike ovih turbina kao što je mogućnost korištenja seriskih modula koji imaju iste karakteristike te se mogu seriski proizvoditi, također se očekuje i da hidrokinetički sustavi

budu ekološki prihvatljiviji u usporedbi s konvencijalnim hidroelektranama i branama za morske mijene. [6]

Kinetičke turbine pogonjene tokom vode se mogu koristiti za proizvodnju električne energije iz bilo kojeg toka vode čija brzina je veća od 0,5 m/s. Zbog niske cijene investicije i troškova održavanja, ova tehnologija je isplativa u usporedbi s drugom tehnologijama. Za razliku od toga proizvodnja energije iz “offshore“ izvora, kao što je energija morskih struja, generalno gledajući je skuplja od one koja se odvija na kopnu. Stoga je i njihovo istraživanje ograničeno. Do snižavanja njihove cijene će doći tek kada ta tehnologija bude dovoljno razvijena, te bude omogućena masovnija proizvodnja.

Rotori kinetičkih turbina se dizajniraju na istoj osnovi kao i rotor vjetroturbina. S tom razlikom da je okoliš u kojemu se nalaze vodne turbine i vjetroturbine jako različit, u pogledu gustoće, viskoziteta i otpora strujanju. [2]

2. TIPOVI KINETIČKIH VODNIH TURBINA

Dva najčešća koncepta malih kinetičkih vodnih turbina su turbine s aksijalnim i turbine s poprečnim tokom. Navedena podjela vrijedi bez obzira dali se radi o kinetičkim turbinama koje proizvode električnu energiju iz toka vode ili iz energije morskih struja i valova.

Kod turbina s aksialim tokom os rotacije lopatica je paralelna s tokom vode. Dok je kod turbina s poprečnim tokom os rotacij lopatica okomita na tok vode. Prednost vertikalnih turbina je ta što se one mogu rotirati u oba smijera. [2]

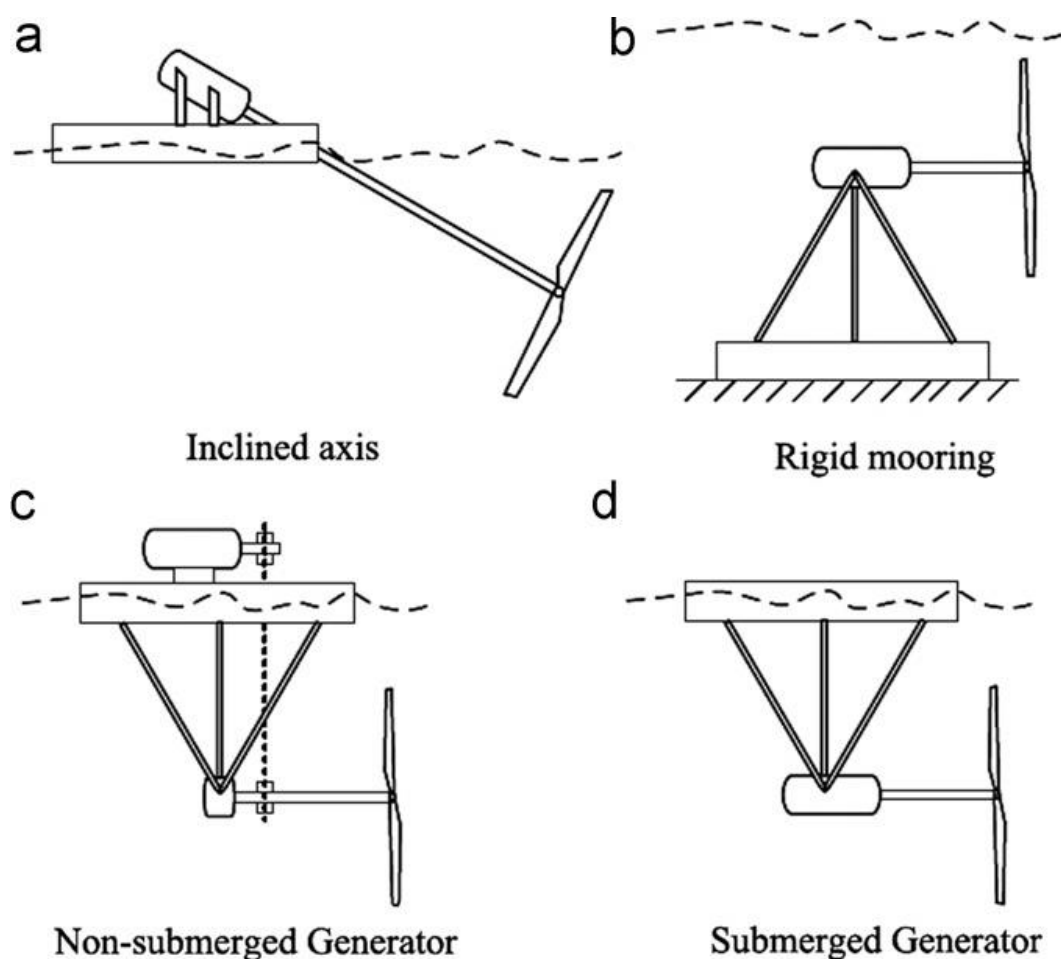
Kinetičke vodne turbina rade na isti način kao i vjetroturbine. Jedina razlika je u tome da je gustoća vode mnogo veća u odnosu na gustoću zaka, što znači da lopatice hidroturbina mogu biti manje, te će se vrtjeti sporije u odnosu na vjetroturbine, ali će i dalje davati značajnu snagu.[1]

Iako se turbinski sustavi za iskorištavanje kinetičke energije vodenoga toka i dalje smatraju primarniom opcijom za pridobivanje električne enegije na ovaj način, i ostali sustavi koji imaju istu namjnu, a koji ne koriste turbine se s velikom zainteresiranošću istražuju. Na kraju ovoga poglavlja biti će dan kratki pregled nekih od ovih tehnologija

2.1. Aksijalne vodne turbine

Aksijalne turbine se često nazvaju horizontalnim turbina. Kod njih je smijer toka vode paralelan s osi rotacije lopatica turbine, na slici 1. prkiazana je njihova podjela. Tubine s nagnutom osi (a) su u najvećoj mjeri ispitivane u svrhu primjene u malim riječnim tokovima. Turbine s horizontalnom osi (b,c i d) proizvode električnu energiju iz toka vode na gotovo jednak način kao što vjetroturbine proizbvide električnu energiju iz struje zraka. Ovaj tip kinetičkih turbina se najčešće koristi za dobivanje električne energije iz energije morskih struja i valova.

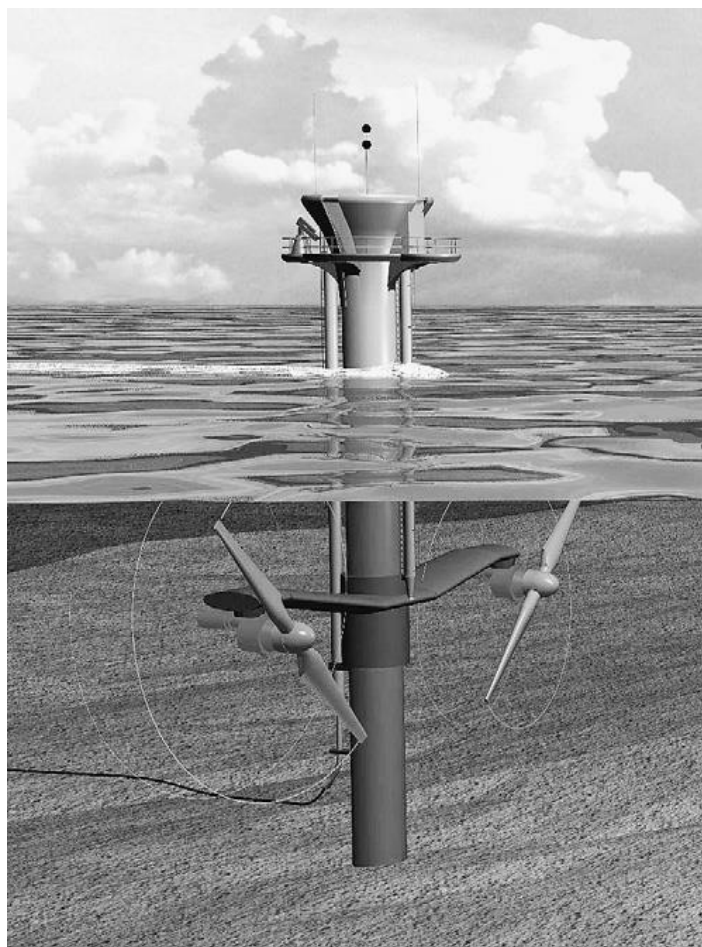
Dalje se aksijalne vodne turbine prema način pričvršćivanja mogu podjeliti na fiksirane (b) i plutajuće (c,d).



Slika 1. Horizontalne hidroturbine [2]

Za razliku od vertikalnih turbina, horizontalne turbine se mogu same pokrenuti. Ali su sistemski troškovi horizontalnih turbina veći zbog korištenja potopljenih generatora i spojki. Turbine s vertikalnom osi, a posebno tipovi H-Darrieus turbine s dvije ili tri lopatice su razmjerno efikasne, te je njihov dizajn jednostavniji, ali se ne mogu same pokrenuti (potreban im je mehanizam za pokretanje). [2]

Na slici 2. prikazana je prototip turbine kompanije SeaGen u punoj veličini, postavljen je u Strangford Loughu u Sjevernoj Irskoj 2008. godine.



Slika 2. SeaGen kinetička turbina [3]

Na slici 3. prikazana je turbina kompanije OpenHydro, nalazi se u Kanadi. Njezina inovativna i jednostavna konstrukcija omogućuje joj da izdrži snažne morske struje, a u isto vrijeme nema nikakav utjecaj na morske životinje jer ne koristi ulje koje bi moglo iscuriti, nema izloženih vrhova lopatica, te u središtu ima otvor značajnih dimenzija. [3]



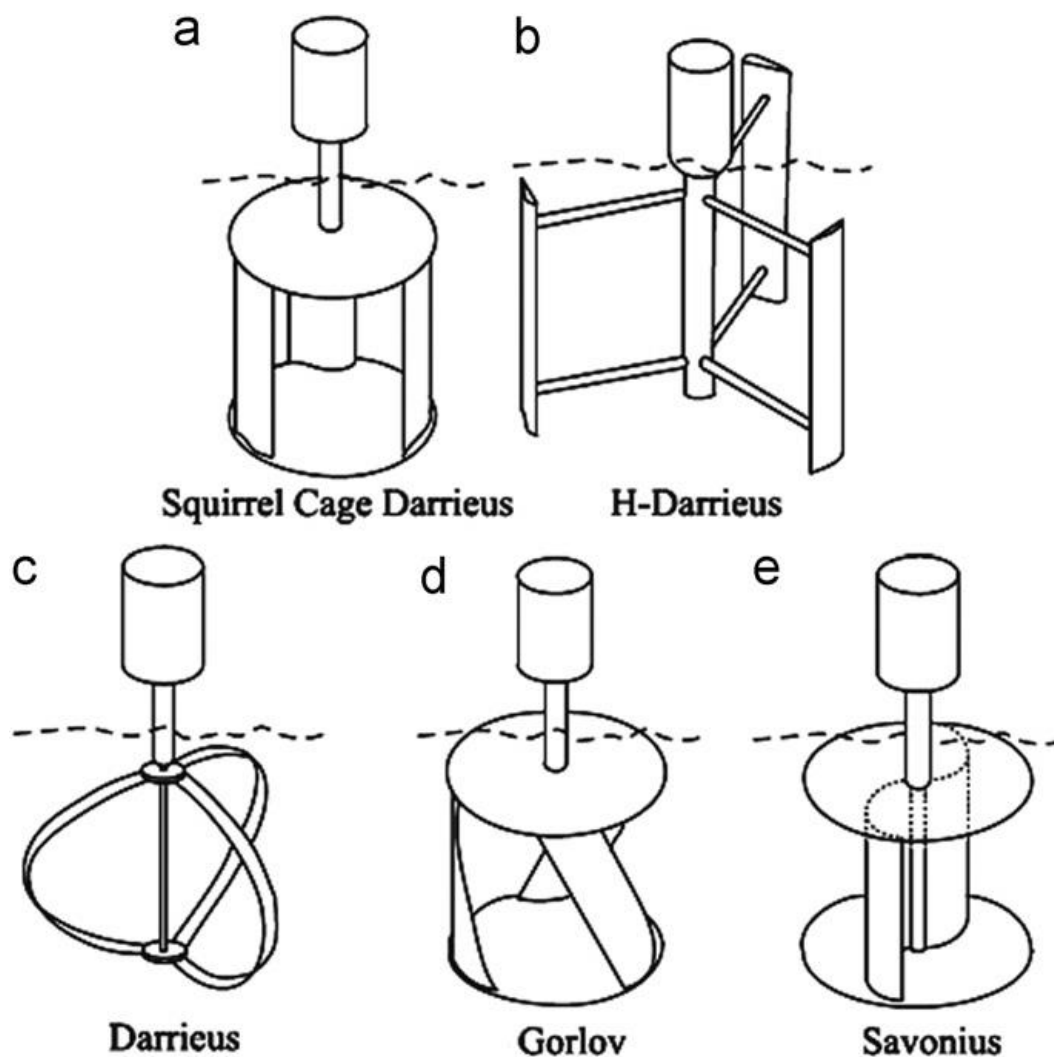
Slika 3. OpenHydro kinetička turbina [3]

Kako možemo vidjeti iz predhodna dva primjera horizontalnih turbina, broj lopatica varira od prvog primjera SeaGen kinetička turbina s dvije lopatice do drugog primjere OpenHydro kinetička turbina s devet lopatica.

2.2. Turbine s križnim protokom

Turbine s poprečni tokom se mogu podjeliti u dvije grupe: turbine s vertikalnom osi i turbine s osi paralelnom s ravninom vode.

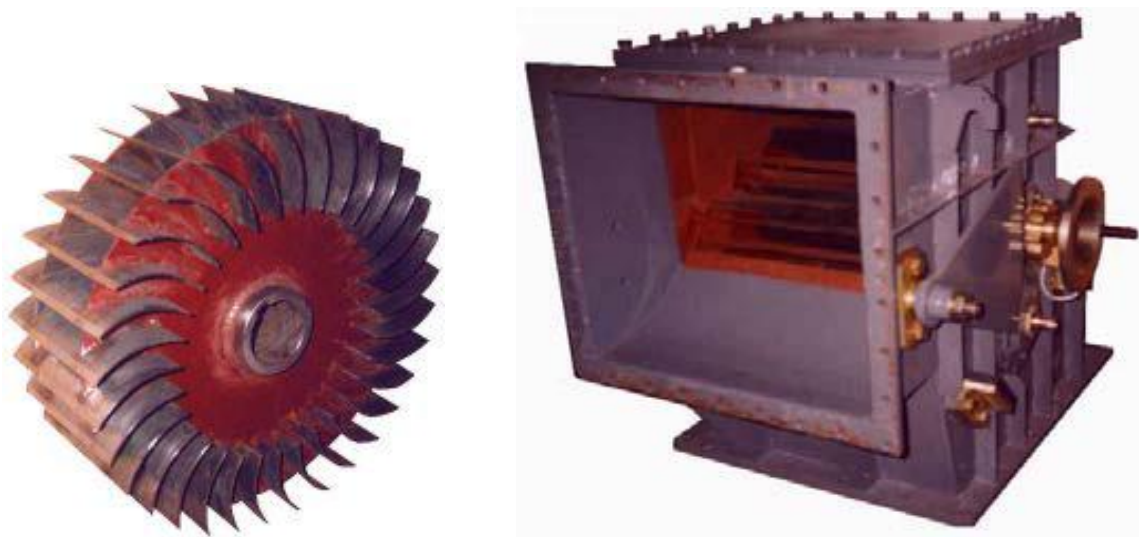
Na slici 4. prikazana je daljna podjela ove vrste kinetičkih vodnih turbina.



Slika 4. Vertikalnealne turbine [2]

Kod ovih turbina os rotacije je na horizontalnoj ravnini površine vode, slika 4. (a). Najčešće su bazirane na korištenju sile otpora, te stoga imaju nižu efikasnost u odnosu na turbine koje koriste uzgonsku silu za pogon. Drugi problem ove vrste turbina je taj što je za njihovu izradu potrebno više materijala nego za većinu drugih tipova kinetičkih turbina. Često se nazivaju i plutajućim vodenim kotačima. [2]

Na slici 5. prikazana je turbina ovoga tipa ruskog proizvođača Energy Alliance, koja je namjenjena za korištenje ispod površine rijeke. Tako da njezin rad neovisi o tome dali je površina rijeke zamrnuta ili ne. [4]



Slika 5. Turbine s osi paralelnom s ravninom vode [4]

2.2.1. Turbine s vertikalnom osi

Kod ovih turbina os rotacije je vertikalna na ravninu vode. Razne vrste ovih turbina su prikazane na slici 2. Kod ovih turbina najčešće se primjenjuju H-Darroud i SquirrCage Darreus turbine. Primjera korištenja Darreus turbina za proizvodnju električne energije u hidroelektranama gotovo i ne postoji. U ovu skupinu turbina spadaju i Gorlov turbine, kod njih su lopatice spiralnog oblika. Savonius turbine su turbine koje koriste silu otpora za okretanje rotora, koji se može sastojati od ravnih ili savijenih lopatica.

Nedostatci ove vrste turbina su da imaju mali početni moment i nisku efikasnost. Ove turbine se ne mogu same pokrenuti, te im je stoga potreban vanjski mehanizam za pokretanje. [2]

2.2.1.1. Darrieusova turbina

Darrieusovu turbinu 1931. godine patentirao je G.J.M Darrieus. Ova turbina ima lopatice aerodinamčnog oblika u obliku užeta, prikazana je na slici 6. Od nastanka Darrieus turbine ona se razvila u niz različitih oblika, u koje se ubrajaju i H-Darrieusova i Squirrel cage Darrieusova turbina. [5]



Slika 6. Darrieusovu turbinu

2.2.1.2. H-Darrieusova turbine

Dizajn H-Darrieusova turbine koristi uzgonsku silu koja nastaje prelaskom vode preko lopatica, koja onda generira resultantnu silu u smjeru rotacije. Većina tipova Darrieus turbine nije samostartajuća, te se moraju zavrtjeti do određenog tip speed ratio (TSR) motorom prije nego što turbina može početi proizvoditi električnu energiju. H-Darrieus turbine obično imaju tri ili

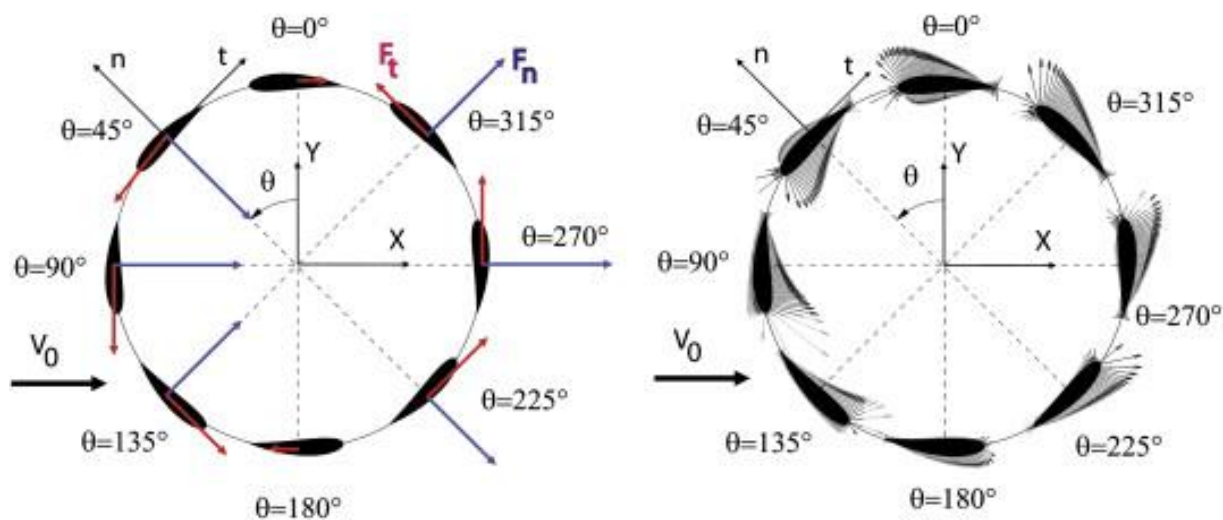
četiri lopatice, ali se ponekad nizajnjiraju i s pet lopatica. Broj lopatica ovisi o brzini toka vode, traženoj efikasnosti i brzini rotacije turbine. [5]



Slika 7. EnCurrent H-Darrieusova turbina [2]

Način rada H-Darrieusove turbine

H-Darrieusova turbina radi koristeći relativnu brzinu, uzgon, otpor i nastale rezultatne sile. Dolazeći tok generira relativnu brzinu strujanja i napadni kut na određenim mjesima uzduž lopatice tijekom njezine vrtnje, taj dolazeći tok rezultira nastanak dvaju hidrodinamičkih sila, sile otpora i sile uzgona. Ove dvije hidrodinamičke sile dovode do nastanka normalne i tangencijalne sile. Slika 8. prikazuje obje navedene sile, a može se i vidjeti da rezultatna tangencijalna sila pomaže u vrtnji turbine, te stoga dolazi o proizvodnje snage. Slika prikazuje i distribciju tlaka koji djeluje na lopaicu prilikom njezine rotacije, vektori tlaka ukazuju da nastala rezultatna sila djeluje u smjeru vrtnje turbine. [4]



Slika 8. Distribucija sila i tlaka na H-Darrieusovu turbinu [5]

2.2.1.3. Squirrel cage turbina

Squirrel cage i turbina je varijacije H-Darrieusove turbine koja na sebi ima završne ploče. Na slici 9. prikazana je jedna takva tubina. [4]



Slika 9. EnCurrent Squirrel cage Darrieusova turbina [4]

2.2.1.4. Gorlova turbina

Gorlova turbina je varijacije H-Darrieusove turbine. I squirrel cage i Gorlov turbine imaju završne ploče, a Gorlova turbina uz to još ima i uvinute lopatice. Uvinute lopatice Gorlov turbine omogućavaju da je dio lopatice uvijek okrenut prema dolaznom toku pri optimalnom kutu, a u isto vrijeme smanjuju probleme vibracija koji se mogu pojaviti kod očičnih Darrieus turbine. [4]

Na slici 10. prikazana je GHT Gorlova turbina.



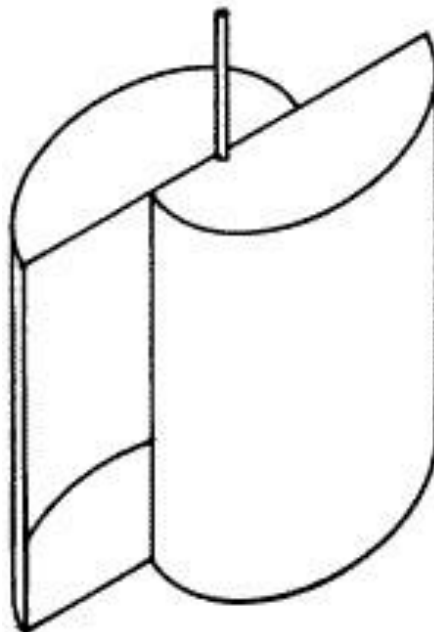
Slika 10. GHT Gorlova turbina [2]

2.2.1.5. Savoniusova turbina

Ova vrsta turbina se obično koristi kada su pouzdanost i cijena od velikog značaja. Primjer ovoga je njihovo korištenje u udaljenim izoliranim mjestima gdje je potreba za električnom energijom i održavanjem mala.

Savoniusovu turbinu izumio je Finski inženjer Sirgurd Johannes Savonius 1922. godine. Gledano odozgo turbina s dvije lopatice izgleda kao slovo S, a može imati i tri lopatice.

Zbog zaobljenih lopatica na turbinu djeluje manja sila otpora kada se ona giba u suprotnom smjeru od smjera toka s ispupčenom stranom lopatice nego kada se giba s tokom. Stoga je sila otpora uvijek jača u jednom smjeru i dolazi do rotacije. [7]



Slika 11. Savoniusova turbina [7]

2.3. Razlike u turbinama s obzirom na mjesto primjene

Dva osnovna područja gdje se kinetičke vodne turbine mogu koristiti u svrhu generiranja električne energije su riječni tokovi i morske mjene. Morske struje predstavljaju drugi potencijalni izvor energije oceana gdje je protok vode jednosmjernan, za razliku od dvosmjerne varijante koja koristi energiju morskih struja. Uz prethodno navedene postoje i dodatni izvori u koje se ubrajaju umjetni kanali, kanali za navodnjavanje, te industrijski ispusni kanali. Premda sve kinetičke vodne turbine funkcioniraju na istim principima pretvorbe energije bez obzira na područje u kojem se koriste, može se pojaviti određeni broj razlika među njima u obliku konstrukcijskih i radnih karakteristika. Među navedene karakteristike se ubrajaju sljedeće:

- Konstrukcija
 - Veličina: kako bi se postigla ekonomična veličina, turbine pogonjene morskim mijenama se trenutačno dizajniraju za veće kapacite (nekoliko MW). Turbine

namjenjene za primjenu u rijekama s druge strane, se razmatraju u rasponu od nekoliko kW pa do nekoliko stotina kW.

- Smijer: tok rijeke je jednosmijeran što eliminira potrebu za rotacijom rotor. Dok kod morskih mijena turbina može raditi tokom obje morske mijene, ako se montira mehanizam koji je potreban za rotaciju/naginjanje turbine.
- Postavljanje: ovisno o poprečnom presjeku kanala, turbine za morske mijene ili riječna turbina jedino se mogu postaviti na morsko/riječno dno ili na neki drugi način pričvrstiti (na plutajuću konstrukciju ili pričvršćene na konstrukciju pričvršćenu za kopno). Navedeno proizlazi iz velikoga broja tehničkih (kapacitet za generiranje električne energije, potrebna instrumentacija) i netehničkih (komercijalna i nekomercijalna plovidba, ribarstvo) ograničenja.
- Način rada
 - Karakteristike protoka: karakteristike protoka riječnoga toka se uvelike razlikuju od karakteristika morskim mijenama. Dok prve imaju velike stohastičke promjene (od sezonskih do dnevnih), posljednje su podvrgnute fluktuacijama dominantno periodične prirode (dnevne do poludnevne). Nosači na kojima se ovakve turbine nalaze mogu u oba dva navedena slučaja biti raznovrsni.
 - Gustoća vode: gustoća morske vode veća je od gustoće riječne vode. Navedeno za rezultat ima da kinetičke turbine smještene u riječnim tokovima imaju manji kapacitet za generiranje električne energije. Uz to, ovisno o razini saliniteta i temperaturi, morska voda na različitim lokacijama i u različito vrijeme ima različiti energetska kapacitet.
 - Kontrola: turbine za morske mijene su kandidati za rad pri unaprijed predviđenim uvjetima morskih mijena. Riječne kinetičke turbine možda neće biti dio istoga koncepta kontrole te će možda biti potrebna sinteza dinamičnijih kontrolnih sustava.
 - Predviđanje resursa: stanja morskih mijena se mogu gotovo u potpunosti predvidjeti te se mogu koristiti već dostupne karte za koordinaciju rada elektrana pogonjenih morskim mijenama. Kod upotrebe za rijeke, predviđanje stanja toka mnogo je složenije te mnoge lokacije neće imati takve podatke. Za kinetičke vodne turbine, razina izlazne energije direktno je vezana s brzinom toka. Premda su za brojne lokacije dostupni podatci o volumetričkim protocima, brzina se može mijenjati od jedne potencijalne lokacije do druge ovisno o poprečnom presjeku na

toj lokaciji. Stoga, ukoliko korelacija između promjene protoka i poprečnog presjeka lokacije nije uspostavljena, a turbine ne rade u skladu s tim, ne može se postići optimalan način rada .

- Krajnje korištenje

- Spojivost na mrežu: dok će turbine pogonjene morskim mijenama možda biti primjenjene u velikoj mjeri (analogno velikim vjetro parkovima), kinetičke vodne turbine koje se primjenjuju u riječnim tokovima će možda postati korištene za osiguravanje električne energije udaljenim mjestima ili će se koristiti u otočnom rad. Ovisno o tome na koji način će se ova tehnologija razijati, ova vrsta alternativnoga načina pridobivanja električne energije možda će postati dio distributivne mreže u bliskoj budućnosti. Veliki porast u generiranju električne energije pomoću elektrana pogonjenih morskim mijenama se očekuje tek na duži vremenski rok. Predpostavlja se da će ove tehnologije naići na iste probleme vezne uz njihovu integraciju u elektroenergetsku mrežu kao i vjetroturbinski sustavi te će biti u mogućnosti iskoristiti svoju veću predvidivost resursa.
- Ostale namjene: kinetičke vodne turbine se potencijalno mogu koristiti u spoju s postojećim velikim hidroelektranama gdje se njihov odvedeni toka može iskoristiti za povećanje kapaciteta hidroelektrana (to jest maksimizirano korištenje resursa). Direktno pumpanje vode u svrhu navodnjavanja, desalinizacije morske vode, te za grijanje prostora su neka od potencijalnih područja krajne primjene ovih tehnologija. [6]

2.4. Sustavi za iskorištavanje kinetičke energije vodenoga toka bez trbina

Trenutno se različiti kinetički turbinski koncepti i konstrukcije uvelike istražuju dok su sustavi za pridobivanje električne energije z kinetičke energije vodenoga toka bez turbina trenutno u fazi dokazivanja pojedinih koncepata (uz neke iznimke). Stoga se onim prvim tipovima uređaja pridaje veća pažnja, koju oni i zaslužuju jer je siguran njihova primjena u bliskoj budućnosti.

U nastavku će biti navedeno nekoliko bezturbinskih koncepata s njihovim vrlo kratkim opisom:

- Flutter Vane: sustavi koji se baziraju na principu generiranja električne energije pomoću hidroelastične rezonance, slika 12.



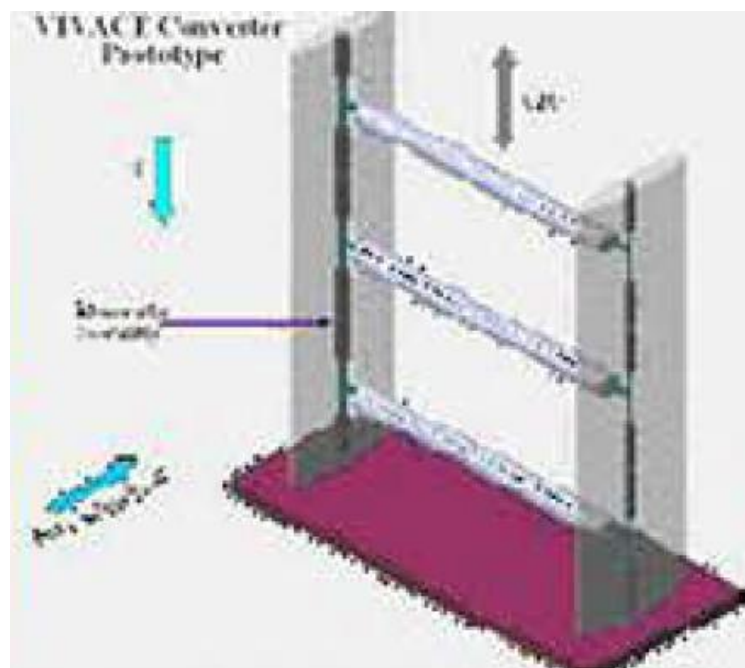
Slika 12. OCPS

- Piezoelectric: piezoelektrično svojstvo polimera se iskorištava za generiranje električne energije kada se ploča takvog materijala stavi u tok vode, slika 13.



Slika 13. EEL

- Vortex induced vibration: iskorištava vibracije koje nastaju kada se vrtlozi stvaraju i otkidaju na nizvodnoj strani strmog tijela koje se nalazi u struji vode, slika 14.



Slika 14. VIVACE

- Oscillating hydrofoil: vertikalne oscilacije hidrodinamičkih lopatica se mogu iskoristiti za generiranje fluida pod tlakom te stoga i za pogon turbine. Varianta ove vrszte sustava uključuje i biomimetičke uređaje u svrhu prikupljanja energije, slika 15



Slika 15. Seasnail

- Sails: iskorištava potisak koji nastaje gibanjem foliskih ploča u vodenom toku, slika 16. [6]

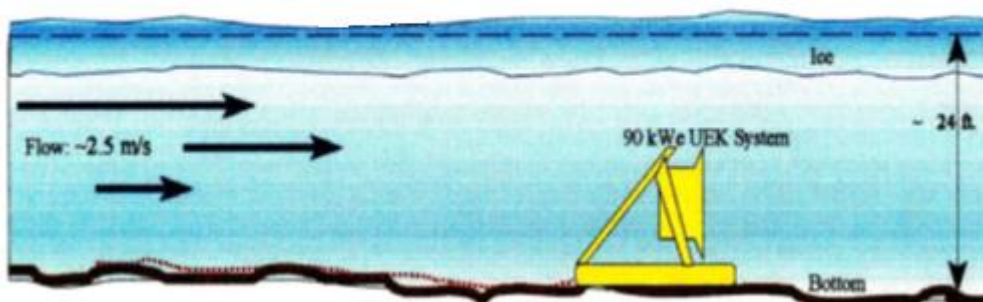


Slika 16. Tidal Sails

3. NAČINI INSTALACIJE KINETIČKIH VODNIH TURBINA

Postoje različiti načini na koje se turbine mogu spojiti s riječnim ili morskim dnom, a to su:

- Kruto fiksirane turbine:
 - Pričvršćivanje na dno pomoću gravitacije: fizički su pričvršćene na morsko ili riječno dno pomoću vlastite težine. U nekim slučajevima mogu postojati i dodatni način spajanja koja povezuju konstrukciju s dnom, iz sigurnosnih razloga, slika 17.



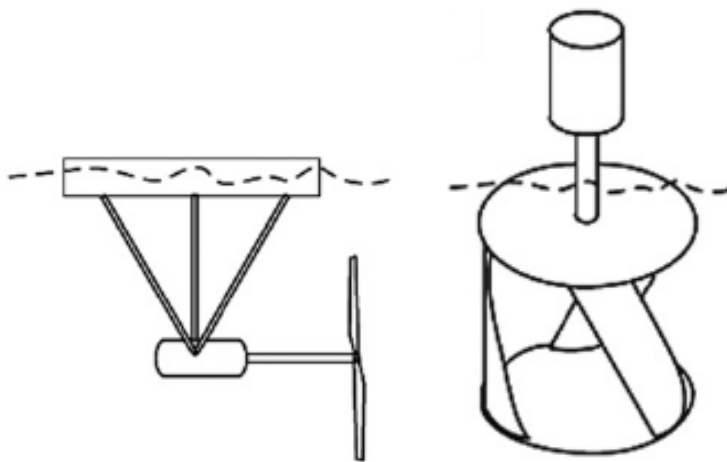
Slika 17. Pričvršćivanje na morsko ili riječno dno gravitacijom

- Pričvršćivanje na stup: princip je analogan s onom koji se koristi kod fiksiranja velikih vjetroturbina, gdje je turbina pričvršćena na stup koji prodire u morsko ili riječno dno. Turbine s horizontalnom osi se često konstruiraju tako da se mogu okretati oko cijele konstrukcije. Također ovaj način pričvršćivanja omogućuje turbini da bude podignuta iznad razine vode radi lakšeg održavanja. Jedan primjer takve konstrukcije kompanije SeaGen prikazan je na slici 18.



Slika 18. Turbine postavljene na stupu [3]

- Sila uzrokovana hidrodinamičkim oblikom: ovakvi uređaji koriste lopatice hidrodinamičkog oblika pričvršćene na okvir koje prolaskom toka vode oko njih induciraju silu koja djeluje prema dolje te tako sprječava pomicanje konstrukcije.
- Plutajuće turbine:
 - Fleksibilno sidrenje: uređaj je pričvršćen pomoću sajle ili lanca s dnom, što dopušta značajnu slobodu kretanja uređaja po površini vode. Tako se dopušta da se uređaj njiše kako s morskim mijenama dolazi do promjene smijera morskih struje, ili kako se mijenja razina vode u rijeci s promjenom protoka.
 - Kruto sidrenje: ostajanje uređaja na određenoj lokaciji je osigurano pomoću sustava za kruto fiksiranje, koji dopušta samo minimalno kretanje konstrukcije. [3]



Slika 19. Plutajuće turbine [2]

4. ODABIR LOKACIJE ZA POSTAVLJANJE KINETIČKE VODNE TURBINE

Odabrana lokacija za postavljanje kinetičke vodne turbine nalazi se u blizini Donjega Miojca, na rijeci Dravi. Na rijeci Dravi su prije bile korištene vodenice koje su služile za mljevenje žita. Vodenice koriste kinetičku energiju toka rijeke koja je proporcijonalna s kvadratom brzine toka rijeke. Tako da su one građene kao poluajuće (pontonske) strukture, na udaljenosti od riječne obale od 5 m, gdje je najveća brzina rijeke. Osim toga, vlasnici vodenica su pomno birali lokaciju vodenice na temelju vlastitog iskusva. Najčešće se odabirala lokacija u blizini desne strane riječne obale (gledano od izvora prema ušću), na mjestima gdje obala skreće u lijevo jer su to mjesta gdje se nalazi glavna riječna struja, koja se nalazi na sredini riječnoga korita, dolazi bliže riječnoj obali te time osigurava veću snagu vodenicama. Prethodno rečeno se može vidjeti na slici 20. na kojoj je prikazana jedna od posljednjih vodenica na rijeci Dravi, koja je bila aktivna do početka 1970-ih godina.



Slika 20. Vodenica na rijeci Dravi pored Podravskih Sesveta [9]

Sve vodenice na rijeci Dravi koristile su vodno kolo pogonjeno vodenim tokom. Uređaji za prijenos energije i mlinsko kamenje su obično postavljani na usidrene pontone s vodnim kolom tako da se energija direktno prenosila s velikog vodnog kola na manje vodno kol koje se koristilo za povećavanje broja okretaja. S manjeg vodnog kola energija se prenosila na dva mlinska kamena koji su se koristili za mljevenje žita. Postojao je i drugi način za prijenos energije s vodnog kola na mlinsko kamenje, koji se koristio u skupljem ali mnogo efikasnijem procesu. Kod ovakvih konstrukcija vodno kolo nalazilo se kod pontona, a mehanička energija se prenosila preko užeta do mlina koji se nalazio na riječnoj obali.

Vodna kola se razvijaju i unaprjeđuju čak i danas, ali se to uglavnom ostvaruje na način da se koristi gravitacijska potencijalna energija u malim i mikro hidroelektranama koje su u pogonu ili su u fazi izgradnje. Osim tradicionalnog vodnog kola postoje i drugi načini za eksploataciju kinetičke energije vodenoga toka pomoću vodnih turbina, kao što su Darrieusov rotor ili Darrieusova turbina.

Za eksploataciju hidrokinetičke energije potrebna su precizna hidrološka mjerenja, koja se u današnje vrijeme izvode pomoću ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) metode.

Mjerenje protoka rijeka u Hrvatskoj izvodi „Državni hidrometeorološki zavod“ kao i „Hrvatske vode“. Budući da se hidrološka mjerenja provode na brojnim lokacijama u Hrvatskoj, te da je ADCP metoda skuplja od tradicionalnoga načina mjerenja, neka od mjerenja se i dalje izvode korištenjem jeftinijih metoda kao što je mjerenje korištenjem boje ili mjerenje propelerom.

Mjerenje protoka korištenjem plutače izvodi se odabirom jedne transverzalne sekcije vodenog toka koji je relativno uniformna, u određenoj duljini. Tada se mjeri vrijeme koje je potrebno da plutača privezana na uže pređe određenu duljinu vodenoga toka. Protok se izračunava pomoću srednje vrijednosti nekoliko obavljenih mjerenja. Rezultantna brzina se treba umanjiti za korekcijski faktor koji nam daje pretpostavljenu glavnu vrijednost koja nije jednaka izmjerenoj brzini na površini riječnoga toka.

Precizni način za mjerenje brzine riječnog toka je mjerenje pomoću propelera. Takav uređaj za mjerenje brzine toka sastoji se od vratila s propelerom ili rotirajućih lopatica pričvršćenih na njegovome kraju. Propeler se slobodno kreće a brzina njegove rotacije ovisi o brzini toka vode. Mehanički brojač bilježi broj rotacija propelera. Propeler se smješta na dubinu na kojoj želimo mjeriti brzinu toka rijeke. Takva mjerenja provode se na jednak način na cijeloj sekciji vodenoga toka, a osnovna brzina se izračunava na kraju obavljenih mjerenja.

Predhodno navedeni načini mjerenja brzine toka rijeke su jako jednostavi i jeftini, ali imaju brojne nedostatke u odnosu na ADCP metodu. Glavni nedostaci su da ovi načini mjerenja traju

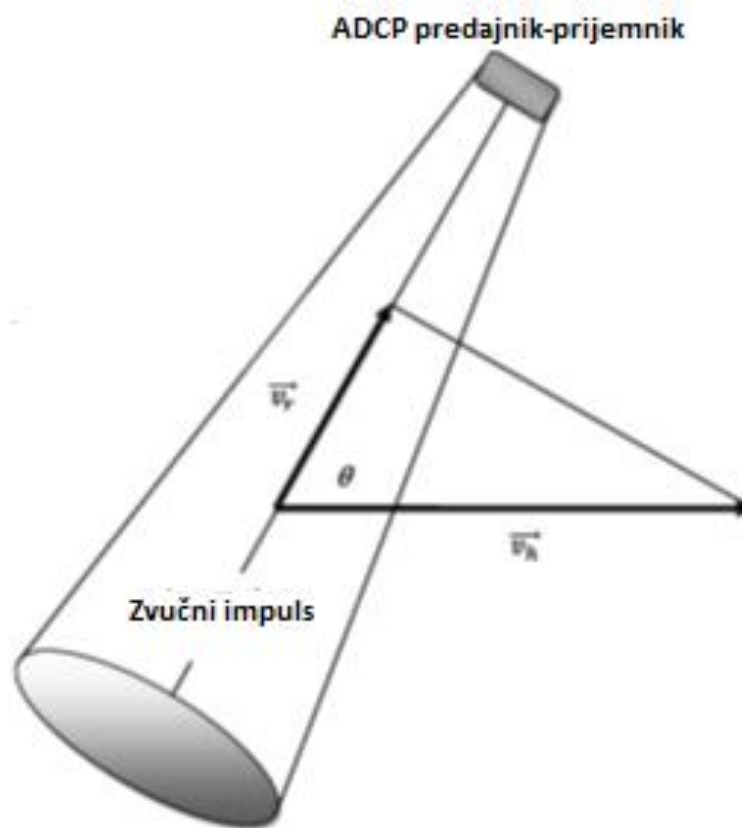
dulje, te se smatraju manje preciznim, a mjerenja su također i diskontinuirana. Također, mjerenja na ovaj način ne mogu biti obavljena na bilo kojem mjestu na određenom riječnom toku. S druge strane, ADCP metoda treba samo jedan prolaz broda s ADCP uređajem kako bi se dobila kompletna i kontinuirana slika vodenoga toka rijeke na kojoj se može vidjeti brzina, dubina i udaljenost od obale. [9]

4.1. ADCP metoda

ADCP je uređaj koji pomoću emitiranih akustičnih impulsa, te bazirano na Dopplerovom efektu, određuje sekciju toka (profil) istraživaniog vodenoga toka kao i podjelu polja brzina (profili brzina) i dubinu duž cijele sekcije toka, na osnovi čega se određuje protok vodenoga toka. Kada se brzina vodenog toka određuje pomoću ADCP uređaja, koriste se zvučni valovi u ultrazvučnom području. Obično se koriste frekvencije veće od 300000 Hz, a najčešće korišteni uređaji su oni koji koriste frekvencije od 300000 Hz, 600000 Hz ili 1200000 Hz. Mjerenje brzine toka rijeke pomoću ADCP uređaja bazirano je na fizikalnom principu primjetne promjene frekvencije. Primjetna promjena frekvencije poznatoga izvora zvuka javlja se kada se izvor kreće relativno u odnosu na promatrača. Kada se mjeri brzina toka rijeke, ADCP uređaj emitira akustične impulse u stupac vode, kroz svoj prijemnik. Prijemnik simultano bilježi povratni eho signala koji biva reflektiran od u rijeci suspendiranih čestica koje su uvijek prisutne u većoj ili manjoj količini. Reflektirani signal se prvo analizira i uspoređuje s emitiranim signalom primjenom auto-korelacijske funkcije i algoritama. Reflektirani signal mora imati formu koja je slična prvobitno emitiranom signalu. Nakon toga se izračunava Dopplerov pomak, iz njega se određuje brzina vodenoga toka, korištenjem sljedeće formule:

$$f_s \frac{v_r}{c} \cos \theta \quad (1)$$

Gdje je f_D Dopplerov pomak frekvencije, f_s je frekvencija zvuka iz stabilnog izvora (iz prijemnika), v_r je relativna brzina gibanja između izvora zvuka i prijemnika, c je brzina zvuka, θ je kut između vektora relativne brzine plovila i smjer trajektorije vala (slika 21.). U isto vrijeme i na isti način se određuje i dubina rijeke.

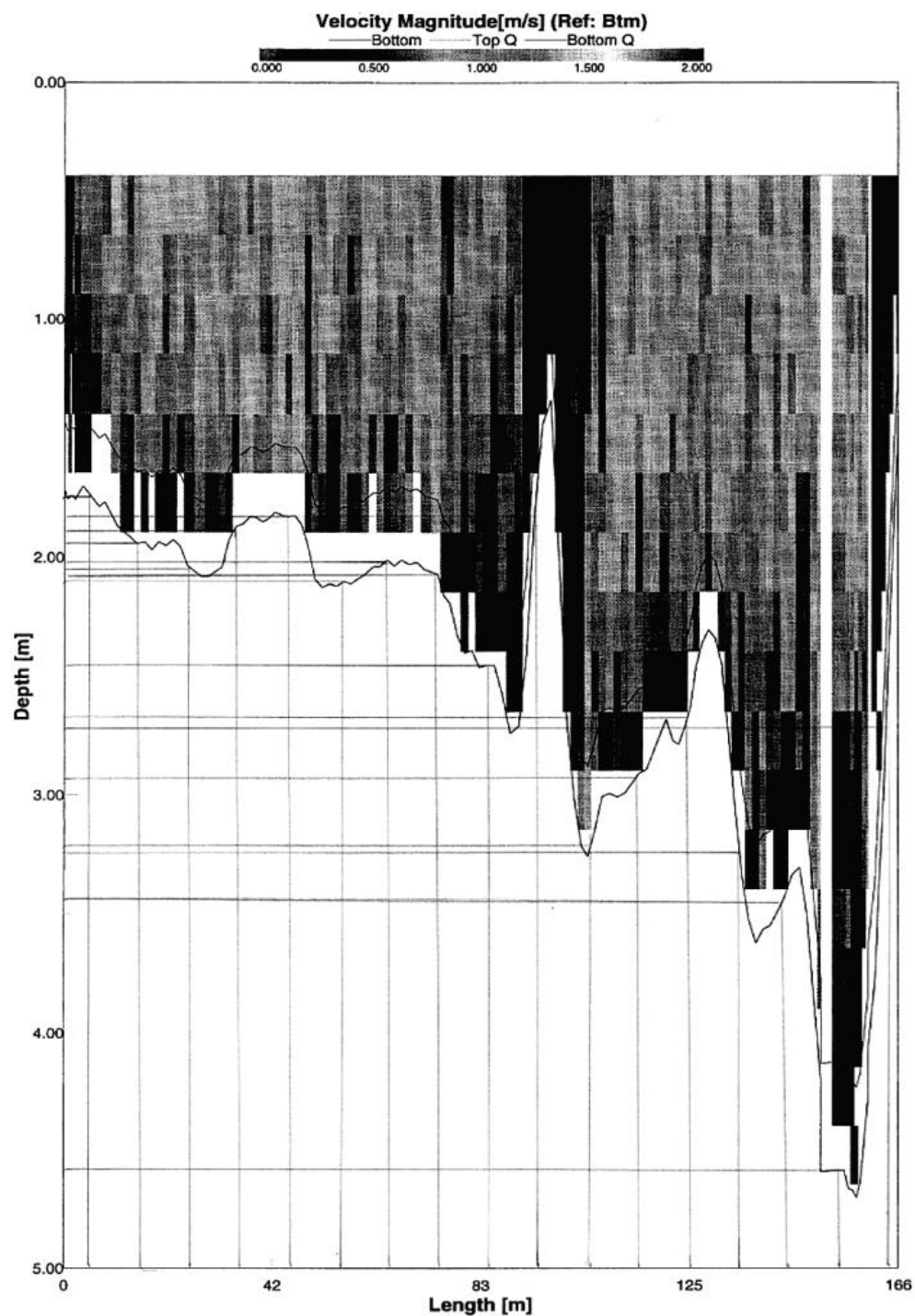


Slika 21. Mjerenje protoka korištenjem ADCP metode [9]

ADCP uređaj je pričvršćen na plovilo na takav način da je potopljen u vodu i usmjeren prema dnu vodenoga toka. Unutar kućišta uređaja smještena su četiri akustična prijemnika, nagnuti pod kutem od oko 25° u odnosu na vertikalnu os uređaja. Svaki od uređaja nezavisno jedan od drugoga generira svoj vlastiti neovisni ultrazvučni signal, te određuje brzinu i dubinu riječnoga toka. Na ovaj način uređaj upotpunosti pokriva prostor koji se nalazi ispod njega. Kod prikazanoga primjera ADCP uređaj je bio smješten na dubinu od 50 cm, ispod površine riječnoga toka.

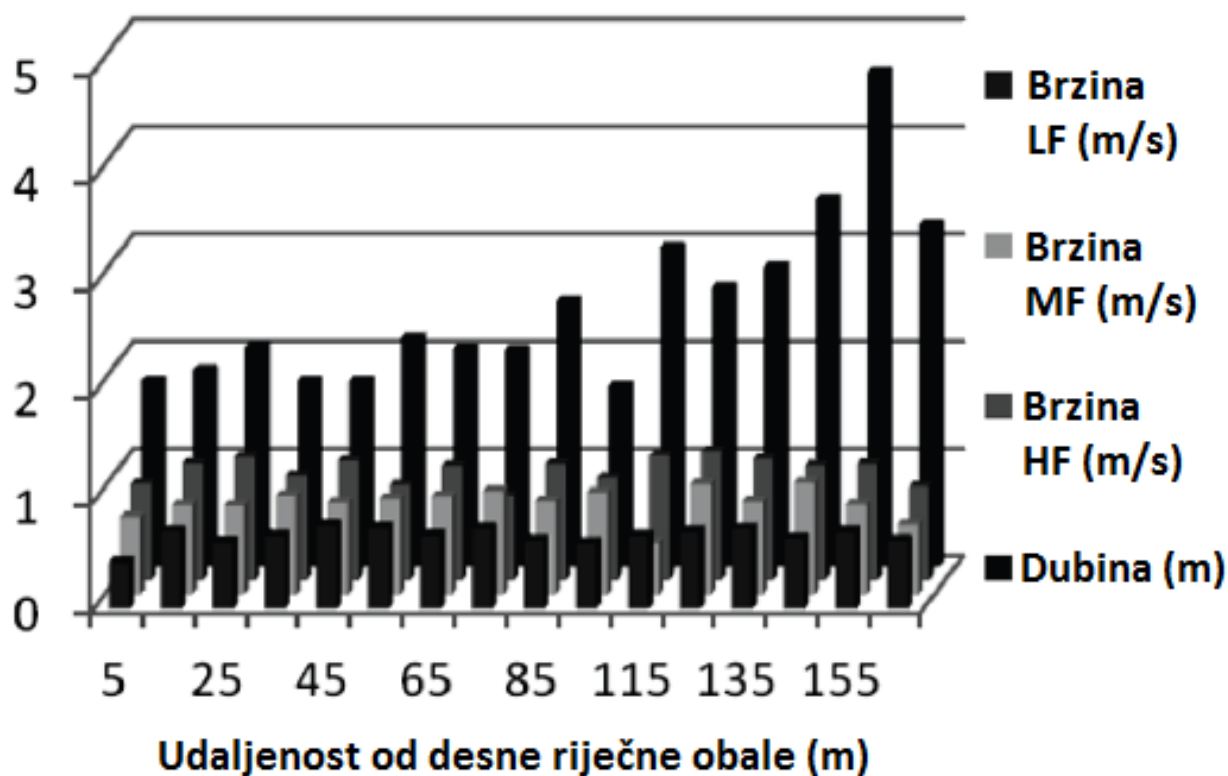
Kako bi se odredila najprikladnija lokacija za korištenje hidrokinetičke energije potrebno je odrediti lokalni maksimum parcialne brzine te dubinu transverzalne sekcije vodenoga toka. Poznavanjem lokalnoga maksimuma parcijalne brzine je potrebno jer snaga kinetičke hidroelektrane ovisi o trećoj potenciji brzine vodotoka. Podatci o dubini vodotoka također su važni jer je kinetička turbina potopljena u vodu iza pontona.

Grafički prikaz mjerenja obavljenih na rijeci Dravi obavljenih ADCP metodom na mjernoj postaji Donji Miholjac prikazan je na slici 22.



Slika 22. Površina kanala rijeke Drave [9]

Za korištenje kinetičke energije vodotoka potrebni su nam podatci o lokaciji s maksimalnom brzinom i dubinom na vodotoku. Tražena lokacija se može odrediti uz pomoć slike 23. i tablice 1. tao što se iz dijagrama za srednji tok može očitati lokalni maksimum parcijalne brzine i lokalni maksimum parcijalne dubine. Prema lokalnom maksimumu parcijalne brzine, najprikladnija pozicija za plutajuću kinetičku hidoturbinu se nalazi na udaljenostima od 125 m i 145 m od desne obale rijeke. Pomatranjem lokalnoga maksimuma parcijalne dubine, najprikladnija lokacija se nalazi na udaljenosti od 145 m i 155 m od desne obale rijeke. Uzimajući sve navedeno u obzir, najprikladnija lokacija se nalazi na udaljenosti od 145 m od desne strane obale rijeke, gdje brzina toka vde iznosi 1,041 m/s, a dubina na toj lokaciji iznosi 3,41 m.



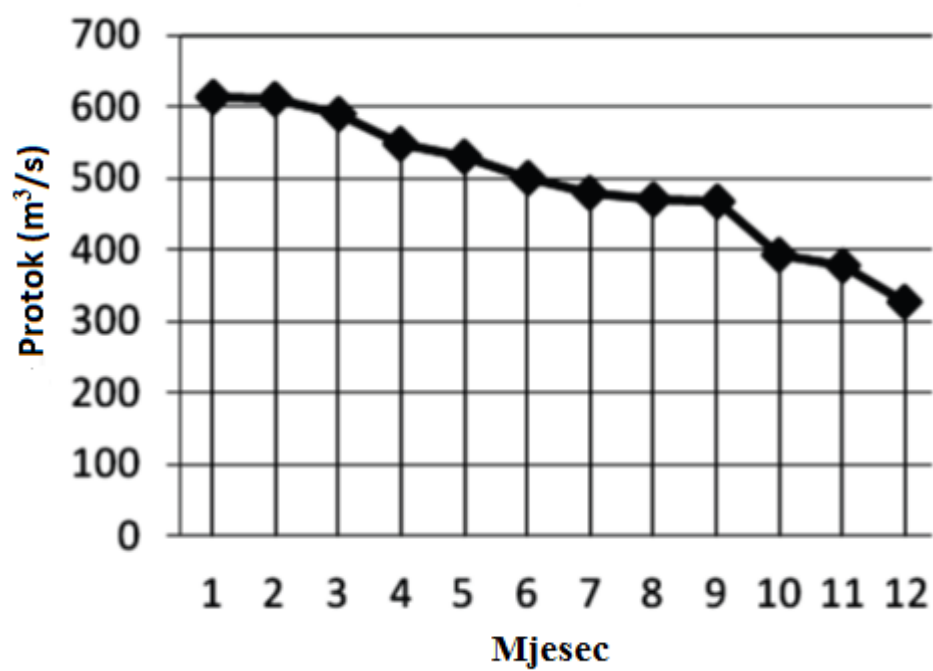
Slika 23. Ovisnost brzine i dubine o udaljenosti od obale [9]

Prednost ADCP metode je ta da se vrlo lako i jednostavno mogu odrediti najbolje mikrolokacije na promatranom vodotoku. Praktički samo jedna bisekcija ili jedno mjerenje mogu nam dati praktično upotrebljive podatke. Pri analizi grafičkog prikaza potrebno je spomenuti da mjerenje s pomoću ADCP metode počinje i završava na udaljenosti od 5 m od riječne obale zbog duljine samoga plovila. Ali sami podatci prikupljeni za udaljenosti koje su bliže riječnoj obali nemaju značajan utjecaj zato što je brzina vode u blizini riječne obale vrlo mala. Potrebno je naglasiti da su brzine vodenoga toka izmjerene na dubini od 50 cm od površine vode.

Tablica 1. Vremenska ovisnost protoka i vodostaja [9]

| | Mali protok (LW) | Srednji protok (MF) | Veliki protok (HF) |
|----------------------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| Protok (m^3/s) | 260 | 480 | 650 |
| Visina vode (cm) | -66 | 52 | 134 |
| Datum | 7.2.2008 | 11.10.2007 | 5.6.2008 |

Godišnja mjernja protoka nisu dovoljna kako bismo mogli donijeti zaključak glede energetskog potencijala određenog vodenoga toka iz razloga što godina u kojoj vršimo mjerenja može biti ekstremna u pogledu oborina ili protoka vode. Pouzdane podatke možemo dobiti samo dugotrajnim mjerenjem vodenoga toka zbog velike promjenjivosti koju uzrokuju uobičajene promjene u klimi. Na slici 24. prikazana je krivulja protoka vode između 1990. godine i 2007. godine prema podatcima državnog hidrometeorološkog zavoda. Iz krivulje trajanja protoka vode za osamnaestogodišnje razdoblje može se uočiti da protok ima stohastične karakteristike, ali u manjoj mjeri nego što je to slučaj pri eksploataciji kinetičke energije vjetra. Važni podatci za izračunavanje hidrokinetičkog potencijala i snage turbine su da protok postoji tijekom cijele godine te da su i najmanje vrijednosti protoka veće od $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Apsolutno najmanji protok izmjeren u ovome periodu iznosio je $164 \text{ m}^3/\text{s}$, a izmjeren je u prosincu 2001. godine. A s druge strane apsolutno najveći protok koji je izmjeren u ovome periodu iznosio je $1897 \text{ m}^3/\text{s}$, navedeni protok je izmjeren u listopadu 1993. godine. [9]



Slika 24. Ovisnost protoka o mjesecu u godini [9]

5. ODABIR VRSTE KINETIČKE VODNE TURBINE

Najbolji odabir za male i srednje rijeke s malom brzinom toka vode su Darrieusove turbine. Razlog tomu je taj što ovakve turbine mogu imati veći pomjer u odnosu na visinu svoga rotora što omogućuje da veća površina lopaitica bude oplahivana vodom ako se turbina nalazi u plićim riječnim tokovima te se tako može proizvesti više električne energije po turbini. Vertikalno postavljena osovina osigurava da se generator i ležaji turbine nenalaze ispod površine vode. [9]

Turbina bi se pričvrstila na nosače na kojima bi se nalazio generator, a sam nosač bi se nllazio na pontonu.

Na slici 25. nalazi se prikaz jedne takve turbine za male vodotokove proizvođača Alternative Hydro solutions.



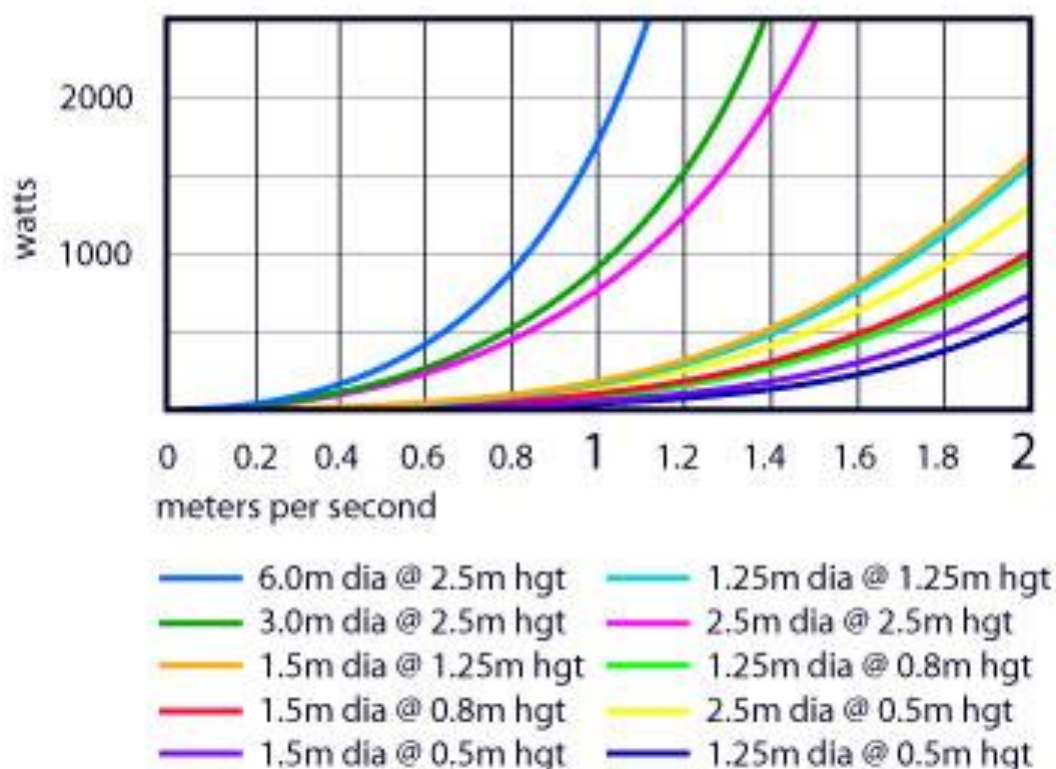
Slika 25. Alternative Hydro solutions Darrieusova turbina

Lopaticice ovih turbina su napravljene od ekstrudiranog alumija 6063T5 s punim presjekom kako bi se osigurala potrebna čvrstoća lopatica. Korištena legura aluminija 6063T5 daje odličnu otpornost na koroziju i glatku površinu lopaticama. Vratilo turbnine je izrađeno od nehrđajućeg čelika kojega podupiru dva standardna ležaja također izrađena od nehrđajućeg čelika. Okvir koji podupire lažaje čine standardne ravne ploče. Snaga se prenosi preko fleksibilne spojke na generator koji generatoru omogućuje da radi pri većim okretnim momentima te tako povećava efikasnost i smanjuje fluktuacije okretnog momenta. [13] Na slici 26. prikazana je lopatica Alternative Hydro solutions turnine.



Slika 26. Lopatica Alternative Hydro solutions [13]

Na slici 27. prikazane su krivulje promjene izlazne snage pojedinog od standardnih turbina kompanije Alternative Hydro solutions s pet lopatica o brzini riječnoga toka.



Slika 27. Ovisnost izlazne snage pojedinih modela Alternative Hydro solutions turbina o brzini vodenoga toka [13]

Iz prethodnoga dijagrama možemo uočiti da turbine s većim promjerima rotora daju veću izlaznu snagu od turbina s manjim promjerom rotora, što je i očekivano, a to se osobito odnosi na područje nižih vrijdnosti brzina vode gdje one gotovo nitit nedaju nikakvu izlaznu snagu.

Zbog relativno male brzine od 1,041 m/s i dubine vode od 3,41 m na odabranoj lokaciji u našem slučaju najbolja opcija je korištenje turbine promjera rotora od 2,5 m i visine rotora od isto tako 2,5 m. Takva turbina bi prema prethodnom diagramu pri srednjoj brzini od oko 1 m/s na izlazu dala snagu od oko 800 W.

6. NASLOV POGLAVLJA

Tehnologije za iskorištavanje energije mora i riječnih tokova su još uvijek u ranom stadiju svoga razvoja s mnogo različitih sustava za generiranje električne energije koji su trenutno u stanju istraživanja. Veliki broj različitih osnovnih konstrukcijskih tipova turbina koji se istražuju mogu se pronaći u literaturi gdje se razmatraju glede njihova efikasnost za generiranje električne energije. Također su razmotrene i sve pomoćne strukture potrebne ovim uređajima za generiranje električne energije, te sustavi za prijenos električne energije do obale.

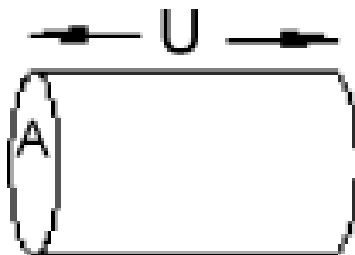
Većina principa pretvorbe energije ovog tipa turbina zasniva se na vjetroturbinama, pošto one rade na sličan način kao i kinetičke vodne turbine.

Tijekom staja sporog strujanja vode, stupac vode dovoljno uzvodno udaljen od turbine poprečnog presjeka diska lopatica turbine A_1 ima sljedeću kinetičku energiju u kroz vrijeme:

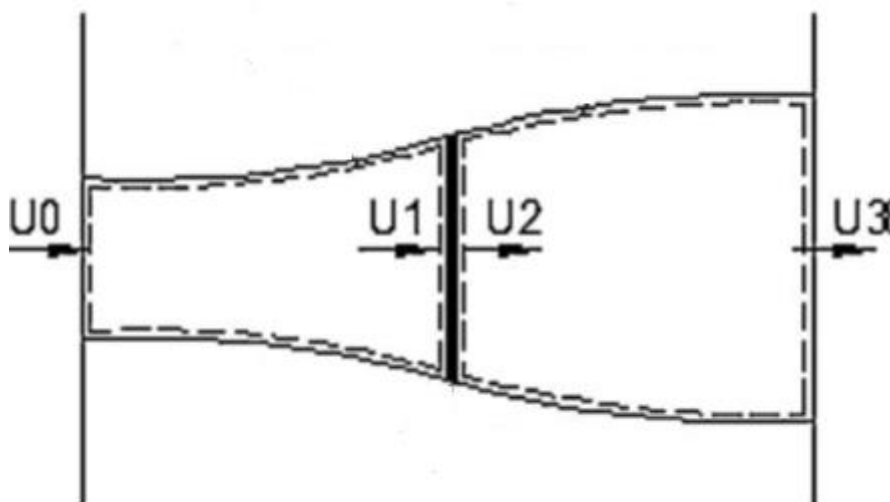
$$P_0 = \frac{1}{2}(\rho A_1 U_0)U_0^2 = \frac{1}{2}\rho A_1 U_0^3 \quad (2)$$

Gustoća vode jako malo ovisi o sadržaju soli u njoj. Površina A_1 je oplahivano područje rotoa. U ovoj analizi pretpostavljen je kontrolni volumen, njegove granice su obale korita vodotoka te poprečni presjeci dovoljno daleko ispred i iza turbine, kako je prikazano na slici 28. Predpostavlja se da je tok vode okomit na poprečni presjeke korita. Turbina je prikazana pomoću uniformnog rotirajućeg diska koji stvara diskontinuitet tlaka u toku vode koja prolazi kroz granice kontrolnog volumena. U ovoj analizi korištene su sljedeće pretpostavke:

- nema otpora trenja
- homogenost, nekompresibilnost, nepromjenjivost toka fluida
- beskonačan broj lopatica turbine
- uniformnost potiska po cijeloj površini diska i rotora
- nerotirajući trag tlaka
- statički tlak dovoljno daleko uzvodno te nizvodno od rotora jednak je statičkom tlaku neometanog dijela toka



Slika 28. Kinetička energija vodenog toka [8]



Slika 29. Model rotirajućeg diska kinetičke vodne turbine [8]

U ovom teoretskom slučaju pretpostavlja se konstantna brzina strujnica vodenog toka koje prolaze kroz i pokraj turbine, te laminarno strujanje, kako je prikazano na slici 29. Duž rotirajućeg diska, postoji promjena tlaka zbog oduzimanja energije i s time povezano smanjenje liniskog momenta vode. Primjenom liniskog momenta na kontrolni volumen, potisak je jednak i suprotnog smijera od stope promjene momenta potoka vode.

$$T = U_0(\rho AU)_0 - U_3(\rho AU)_3 \quad (3)$$

Jednadžba $m = (\rho AU)_0 = (\rho AU)_3$ se može koristiti pri konstantnom protoku. Stoga je:

$$T = \dot{m}(U_0 - U_3) \quad (4)$$

Bernoullijeva jednačba se može koristiti na bilo koju stranu rotirajućeg diska. Ako se postavi za uzvodnu stranu dobije se:

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho U_0^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 \quad (5)$$

Za nizvodnu stranu:

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 = p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 \quad (6)$$

Može se uzeti u obzir pretpostavka da su tlakovi p_0 i p_3 jednakog iznosa, te da je brzina na obje strane diska ostaje ista ($U_1=U_2$).

Drugi izraz za potisak može se dobiti pomoću razlike sila na suprotnim stranama diska:

$$T = (p_1 - p_2) \quad (7)$$

Razlika tlakova p_2-p_1 može se dobiti korištenjem jednačbi (3) i (4), te supstitucijom u jednačbu (6), te se dobiva sljedeća jednačba:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_1(U_0^2 - U_3^2) \quad (8)$$

Došli smo do dva različita izraza za izračunavanje potiska. Izjednačavanjem vrijednosti iz jednačbi (3) i (7) te uzimajući u obzir da je maseni protok vode koji u jedinici vremena prolazi kroz disk dan sljedećim izrazom

$$\dot{m} = \rho A_1 U_1 \quad (9)$$

Stoga

$$U_1 = \frac{U_0 + U_3}{2} \quad (10)$$

Što znači da je brzina vode u rotorskoj ravnini jednaka srednjoj vrijednosti između brzine vode uzvodno i brzine vode nizvodno od rotora. Brzina vode kroz rotirajući disk ne može biti manja od polovice brzina neometanog toka vode. Ako definiramo faktor a , kao smanjenje brzine vode uslijed trenja između neometanog toka i rotorske ravnine, onda je on

$$a = \frac{U_0 - U_1}{U_0} \quad (11)$$

te

$$U_1 = (1 - a)U_0 \quad (12)$$

korištenjem (9)

$$U_3 = (1 - 2a)U_0 \quad (13)$$

Snaga (P) se može dobiti množenjem izraza za potisak s brzinom vode:

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1(U_0^3 - U_3^2)U_1 = \frac{1}{2}\rho A_1 U_1(U_0 + U_3)(U_0 - U_3) \quad (14)$$

Nakon supstitucije U_1 i U_3 iz jednadžbi (11) i (12) u jednadžbu (13), dobivamo sljedeći izraz:

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2 U_0^3 4a(1 - a)^2 \quad (15)$$

Ako A zamijenimo s A_1 i U_1 zamijenimo s U tada dobivamo sljedeći izraz za snagu:

$$P = \frac{1}{2}\rho A U^3 4a(1 - a)^2 \quad (16)$$

Koeficijent snage se definira kao omjer snage koju dobijemo na rotoru i snage toka vode. Stoga je koeficijent snage dan sljedećim izrazom:

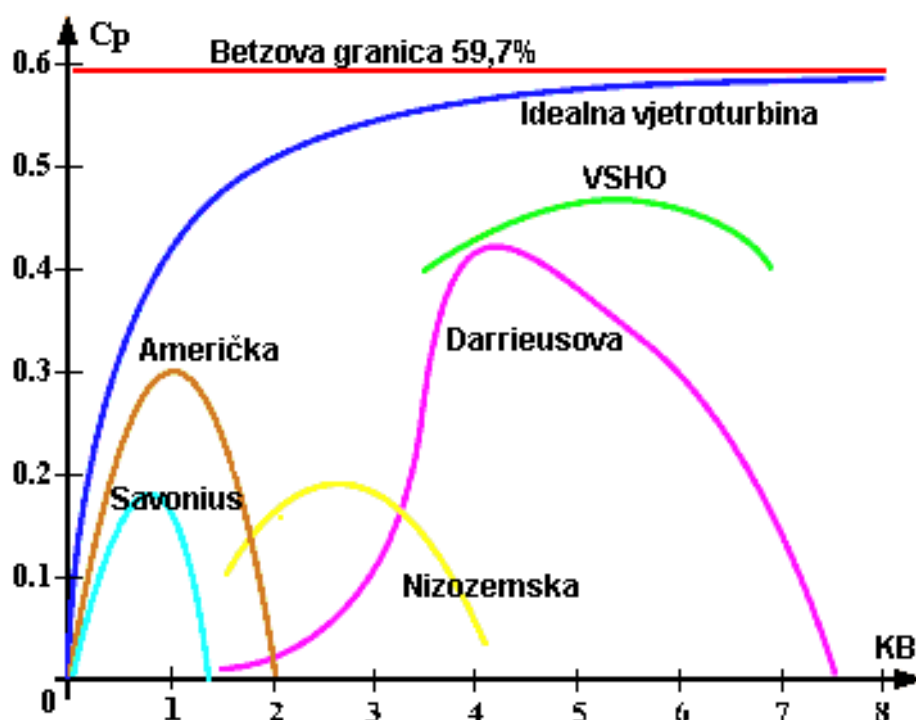
$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (17)$$

Ako u prethodnu jednadžbu uvrstimo da je vrijednost faktora a jednaka nuli, dobivamo da maksimalna vrijednost koeficijenta C_P iznosi 0,59.

Teoretski maksimalna snaga koju možemo dobiti iz rijeke ili mora može se dobiti iz prethodne jednadžbe uz uvrštavanje vrijednosti koeficijenta snage od 0,59 ili efikasnost od 59%. Ali uz to turbine za male kinetičke hidroelektrane imaju i vlastite gubitke koji će smanjiti vrijednost koeficijenta snage na vrijednost od otprilike 0,10 do 0,25. U prethodnoj jednadžbi možemo primjetiti da je rast vrijednosti snage proporcionalan kubu brzine vodenog toka koji prolazi kroz turbinu. Stoga je izrazito važno pronaći mjesto na vodenom toku s najboljom vrijednosti brzine kako bi dobili najveću snagu na turbini.

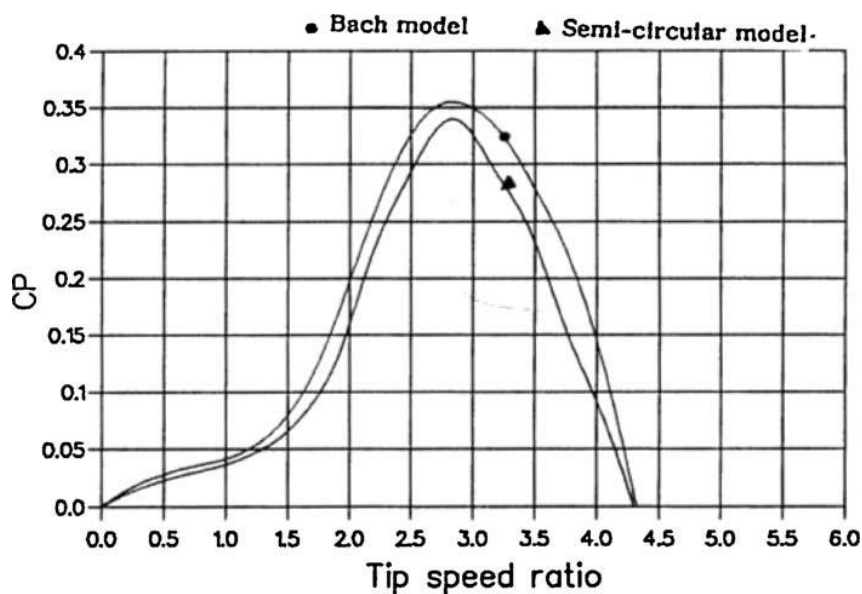
Laboratorijska testiranja i mjerenja efikasnosti turbina koje su u pogonu četo potvrđuju da je vrijednost Betzovog limita previsoka za vjetroturbine, a tako i za kinetičke vodne turbine. To osobito vrijedi ako se uspoređuju različite vodne turbine koje iskorištavaju energiju slobodnog toka, ove turbine potvrđuju tezu da Betzov limit precjenjuje mogućnost korištenja propelera za iskorištavanje kinetičke energije pohranjene u vodi. Na primjer, spiralna turbina je pokazala mogućnost ostvarivanja učinkovitosti od 35 posto, u zabilježenim višestrukim hidrauličkim testiranjima, te je superiorna u odnosu na ostale poznate vodne turbine.

Koeficijenti snage različitih kinetičkih turbina koje se koriste za pridobivanje električne energije iz energije vjetra prikazani su na slici 30.



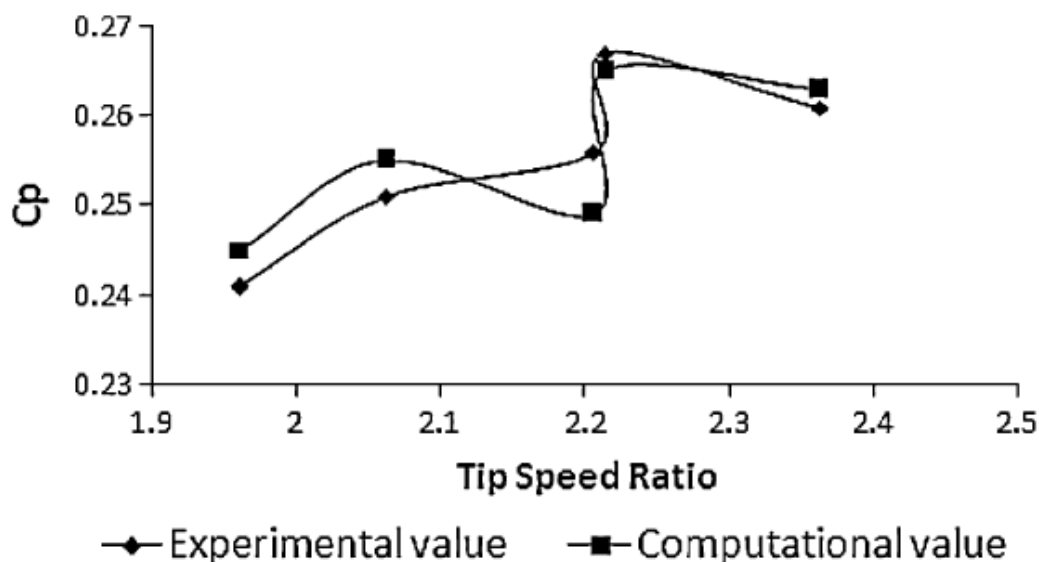
Slika 30. Promjena koeficijenta korisnosti s promjenom koeficijenta brzohodnosti [8]

Koeficijenti snage Darrieus Savonius tipa turbine prikazan je na slici 31.



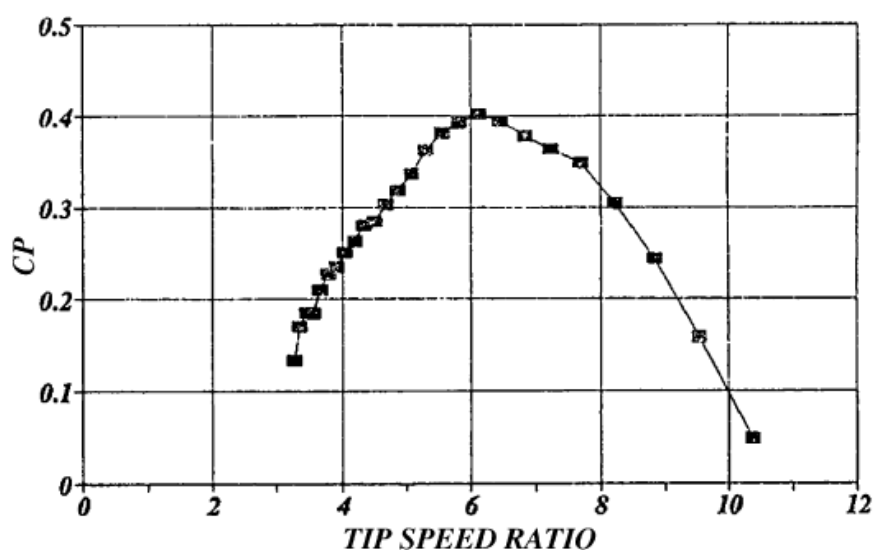
Slika 31. Koeficijenti snage Darrieus Savonius tipa turbine [8]

Odnos koeficijenta snage i TSR-a H-Darrieus turbine prikazan je na slici 32.



Slika 32. Odnos između koeficijenta snage i TSR-a of H-Darrieus turbine [8]

Najveća vrijednost koeficijenta snage za spiralne turbine je 0,31 koji vrijedi za Gorlov turbine. Vrijednost efikasnosti kod većine testova turbina s trostrukom spiralom koje su smještene u slobodnom toku iznosi $CP=0,35$. Koeficijenti snage vertikalnih vjetroturbina prikazan na slici 32.



Slika 33. Koeficijenti snage vertikalne vjetroturbine [8]

S obzirom da se dizajn kinetičkih vodnih turbina ima osnovne razlike u usporedbi s tipičnim vjetro turbinama, koeficijenti snage im se također, na poseban način razlikuju. Osnovna znanja na ovom području su ograničena kao i predviđanje radnih karakteristika ovih turbina, a koje je od velike važnosti. Minimalna brzina toka rijeke pri kojoj ove turbine mogu raditi je oko 0,8 m/s do 1 m/s ali preporučuje se brzina između 1,3 m/s i 1,5 m/s pa sve do maksimuma od 3 m/s za plutajuće turbine. Za primjenu ovih turbina pri većim brzinama vode potrebno je veće inženjersko znanje na ovom području. [8]

7. PROVJERA STRUJNIH KARAKTERISTIKA

Računalna dinamika fluida igra ključnu ulogu u analizi konstrukcije turbostrojeva dozvoljavanjem velikoga broja iteracija za dizajniranje konstrukcije turbine u značajno kraćoj količini vremena nego što bi bilo potrebno za konstruiranje modela i obavljanje ispitivanja na njemu. S porastom snage računala tijekom godina, ovaj alat je postao još robusnija metoda za analizu.

Turbostrojevi predstavljaju izazov za korištenje CFD-a. Fizikalno, aktuatorski disk rotira oko centralne osi pri određenoj kutnoj brzini zbog interakcije između radnog fluida i aktuatorskog diska. Ovo dovodi do nastanka mješanja (gnječenja) koje u području u blizini aktuatorskog diska postaje komplicirani disk.

Rotacija impelera rotora pretvara tok fluida u ovome području u tok koji je nestabilan u svojoj prirodi. Postoje dvije škole mišljenja kada je riječ o modeliranju ove nestabilne prirode fluida. Prva je ona koja rotira i miješa u području aktuatorskog diska pri kutnoj brzini koja je jednaka stupnju rotacije aktuatorskioga diska, te tko računalom oponašati fizikalna svojstva aktuatorskog diska. Druga je ona koja ne rotira sama mješavina, nego rotira referentni rotor u području koje se nalazi u blizini aktuatorskog diska pri kutnoj brzini koja je jednaka kutnoj brzini referentnog rotirajućeg okvira. To dozvoljava relativni proračun parametara protoka ovoga referentnoga rotirajućega okvira. Ciljevi obje navedenih metoda su jednaki, ali obje imaju svoje prenosti i nedostatke u predviđanju spiralnih karakteristika toka u području koje se nalazi u blizini impelera.

Okvir metode referentne rotacije je na kraju odabran za modeliranje promjenjive prirode toka u blizini aktuatorskog diska. Polje brzine je formulirano relativno u odnosu na rotirajući referentni okvir, te su stoga dodane Coriolisova i centripetalna akceleracija jednadžbi momenta. Jednadžba očuvanja mase i očuvanja momenta poprimaju slijedeći oblik:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \vec{v}_r) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{v}_r) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (19)$$

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\eta \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (20)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = (2\bar{S}\bar{S})^{1/2} \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (18)$$

U predhodnim jednadžbama, ρ je gustoća radnoga fluida, μ je vrijednost lokalne dinamičke viskoznosti, μ_t je viskoznost turbulencije, P_k je producirana kinetička energija, k je kinetička energija turbulencije, ε je disipacija energije turbulencije, C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k i σ_ε su propisni koeficijenti, $C_{2\varepsilon}^*$ i η su parametarske konstante, S je modul glavnog stope tenzora naprezanja, a \bar{S} je stupanj tenzora naprezanja. Konstante koje su korištene u ovome proračunu za C_μ , $C_{1\varepsilon}$ i $C_{2\varepsilon}$ su 0,0845, 1,42 i 1,68.

Rubni uvjeti također igraju važnu ulogu u točnosti rezultata. Na ulazu u domenu računalnoga modela, potpuno razvijen profil turbulentne brzine je pretpostavljen. Standardni empirijski odnos koji određuje profil brzine je dan slijedećom jednadžbama:

$$\frac{\bar{v}}{U} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (19)$$

$$n = -1,7 + 1,8 \ln Re_U \quad (20)$$

U prethodnim jednadžbama \bar{v} je prosječna lokalna brzina, U je maksimalna brzina, r je lokalni radius, R je ukupni vanjski radius, n je parametarska konstanta, Re_u je Reynoldsov broj koji uzima u obzir maksimalnu brzinu kao karakterističnu brzinu i promjer cijevi kao karakterističnu duljinu. U ovome odnosu, odnos između lokalne brzine i maksimalne brzine definiran je postotnom udaljenosti od vanjskog radiusa cijevi stavljen na potenciju inverzne snage empiriskoga eksponenta.

Na ulazu i izlazu promatrane domene, definirani su parametri turbulencije za turbulentnu kinetičku energiju i stupanj disipacije turbulencije. Ovi parametri se izračunavaju unatrag preko ulaznih parametara specificiranog intenziteta turbulencije i hidrauličkog promjera. Ulazna strana se koristi za izračunavanje hidrauličkoga promjera. Ova vrijednost se koristi za izračunavanje veličine duljine korištene u izračunavanju k i ε parametara pomoću jednadžbe $l = 0,07 D_H$. Turbulentna kinetička energija i stupanj disipacije se onda mogu izračunati na slijedeći način:

$$k = \frac{3}{2} (\bar{v} l)^2 \quad (21)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (22)$$

Gdje je \bar{v} prosječna brzina, I je intenzitet turbulencije, a l je karakteristična veličina duljine. Ovi odnosi za model turbulencije su korišteni i na ulaznom i na izlaznom presjeku domene.

Model miješanja se koristi za simulaciju višestrukih tokova, korištenjem tekuće vode kao primarne faze a vode pare kao sekundarne faze. Interakcija između svakih od faza posavljena je na „kavitaciju“. Brzina klizanja između dvije faze je zanemarena. Kontinuiranost, moment, i jednačba prijenosa mase model miješanja je:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (23)$$

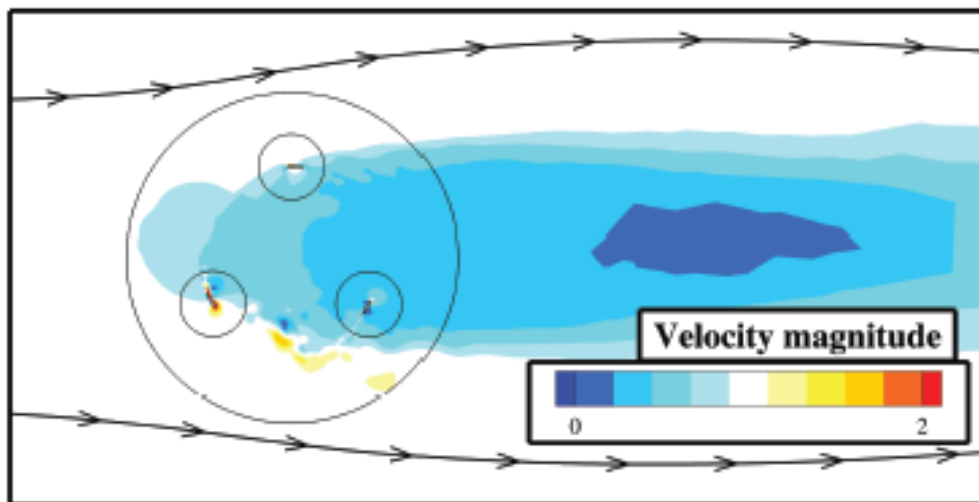
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = & -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m \nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T] \\ & + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{j=1}^n (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) \quad (25)$$

Gdje je ρ_p gustoća vodene pare, a ρ_m je gustoća mješavine. Srednjan masena brzina prikazana je s \vec{v}_m . Volumenska funkcija je prikazana s α . F i g su sile na tijelo i gravitacijsko ubrzanje. Dodatno, povezana brzina skretanja strujanja i relativna brzina predatavljena je s $v_{dr,p}$. Na poslijetku, n izraz u sumi koju možemo vidjeti u jednačbi 25 pridružuje se određenom broju različitih faza koje su prisutno u režimu toka.

SIMPLE segregated solver je korišten kako bi se povezala polje tlaka i polje momenata. Korištena je pretpostavka za korekciju standardnoga tlaka. Uzvodna pretpostavka drugoga reda korištena je i za momentnu prijelaznu jednačbu i za prijelaznu jednačbu turbulencije. Pretpostavka prvoga reda primjenjena je na jednačbi volumenske funkcije. Na poslijetku, vremenski promjenjiva pretpostavka drugoga reda. [10]

Na slici 34 prikazan je primjer prikaza polja brzina nastao računalnim simuliranjem strujanja oko Darrieusove turbine s tri lopatice.



Slika 34. Polje brzine prilikom prolaska vode kroz Darrieusovu turbinu s tri lopatice [14]

7.1. Kavitacijsko ograničenje

Ako je kavitacija izbjegnuta tada se pretpostavlja da BEM teorija vrijedi za kinetičke vodne turbine s aksialnim tokom. Kavitacijsko ograničenje je uvedeno u WT_Perfmodel kako bi se osiguralo da su izračunati rezultati točni. Uvjeti potrebni za izbjegavanje započinjanja kavitacije dan je jednadžbom 26, gdje je σ bezdimenzionalni kavitacijski broj a C_{pmin} je koeficijent minimalnog lokalnog tlaka hidrodinamičke lopatice. Ako uvjeti iz jednadžbe 26. ne vrijedili, tada lokalni statički tlak fluida koji se giba pada na vijednost koja je manja od tlaka isparavanja, te je prekinut kontinuitet toka stvaranjem vodenih mjehurića; kavitacija je počela. Kavitacija uvelike ovisi o distribuciji tlaka fluida koji se giba oko hidrodinamičkih lopatica. Tlak u točki na površini hidrodinamičke lopatice definiran je koeficijentom tlaka C_p . Vrijednosti koeficijenta tlaka ovisi o kutu napada, Reynoldsovom broju, površinskoj hrapavosti, i obliku lopatica. Koeficijenti tlaka tipično se određuju u zračnom tunelu, ili se mogu izračunati korištenjem numeričkih metoda. Bezdimenzijski kavitacijski broj, definiran jednadžbom 2, uzima u obzir promjenu tlaka uzrokovanu aksialno i tangencijalno induciranim brzinama u rotorskoj ravni.

Vrijednost lokalne brzine u rotorskoj ravni dana je jednadžbom 28. korištenjem odnosa iz jednadžbe 26., lokalna brzina potrebna za induciranje kavitacije može se izračunati korištenjem

jednadžbe 29. Kako bi se osiguralo da rotor ne bude podvrgnut kavitaciji, V_{loc} nesmiye nikada premašiti ili biti jednaka $V_{cavitate}$ na bilo kojem mjestu duž lopatice. [11]

$$\sigma + C_{Pmin} \geq 0 \quad (26)$$

$$\sigma = \frac{P_{atm} + \rho gh + \frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 a(2 - a) - \frac{1}{2}\rho(\Omega r a')^2 - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_{loc}^2} \quad (27)$$

$$V_{loc} = \sqrt{[V_{\infty}(1 - a)]^2 + [(\Omega r)(1 + a')]^2} \quad (28)$$

$$V_{cavitate} = \sqrt{\frac{P_{atm} + \rho gh + \frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 a(2 - a) - \frac{1}{2}\rho(\Omega r a')^2 - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_{loc}^2}} \quad (29)$$

8. UTJECAJ KINETIČKIH VODNIH TURBINA NA OKOLIŠ

Hidroenergija nam pruža prednost nad fosilnim gorivima zato što ona koristi vodu kao obnovljivi izvor energije. Voda se smatra obnovljivim izvorom energije zbog hidrološkog kruga u kojem se on nalazi. Voda je čisti izvor energije i neispušta nikakve onečišćujuće tvari u atmosferu. Konvencionalno korištenje hidroenergije ima već dugu povijet korištenja u polju generiranja električne energije. Dakako, konvencijalno korištena hidroenergija iskorištava potencijalnu energiju vode koja se dobiva izgradnjom brana na rijekama. Što zahtjeva velika kapitalna ulaganja te može imati značajne posljedice na lokalni okoliš. Morske i kineičke vodne tehnologije pružaju nam prednost nad konvencionalnim metodama iskorištavanja hidroenergije vode kako bi se generirala električna energija bez potrebe za gradnjom takvih građevinskih objekata. [10]

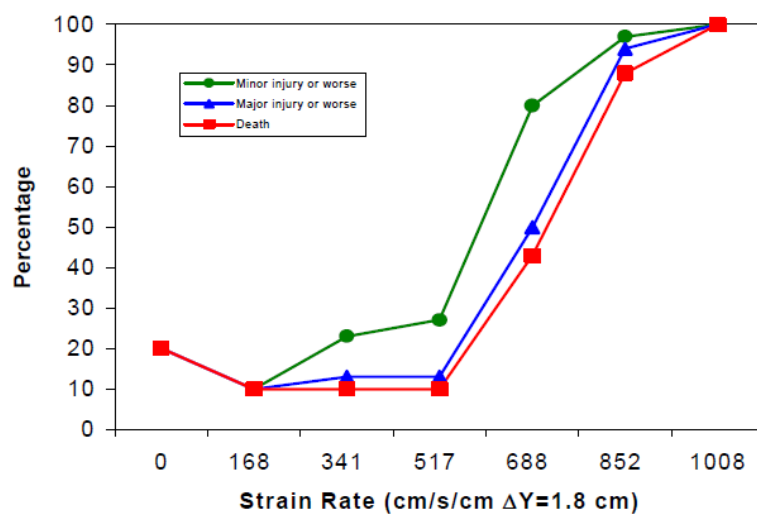
Iz konvencionalnih hidroturbina smo naučili koji čimbenici negativno utječu na životinjski svijet koji se nalazi u rijekama, a ti čimbenici su:

- Kavitacija:
 - Nastajanje parnih mjehurića uzrokovano smanjenjem tlaka pri ili ispod tlaka isparavanja.
 - Parni mjehuri kolabiraju kada dođu do područja s visokim tlakom.
 - Tlačni valovi nastali nasilnim kolabiranjem parnih mjehura mogu ozlijediti ribe.
 - Ako tlak vode ne padne ispod 60% atmosferskog tlaka, kavitacija se neće pojaviti.
 - Može biti potencijalni izvor ozlijeda/uginuća riba koje prolaze kroz kinetičku vodnu turbinu.



Slika 35. Pojava kavitacije na lopaticama [12]

- Tlak:
 - Kinetičke vodne turbine nisu podvrgnute ekstenzivnim i brzim promjenama tlaka za koje se zna da oštećuju ribe tijekom njihovoga prolaska kroz konvencionalne hidroturbine.
 - Ako se pojave smrtonosne ozljede na ribama povezane s tlakom, najvjerojatnije će biti povezane s kavitacijom.
- Smicanje:
 - Smično naprezanje dovoljno za ozljedu riba može se pojaviti blizu rotora/lopatice.
 - Biološki kriteriji za nivo oštećenja smicanjem identificirani su za konvencionalne hidroturbine.
 - Ovi podatci su primjenjivi na kinetičke hidro turbine; informacije o razinama smicanja (magnituda i opseg) trebaju biti razvijene za svaki turbinski dizajn.



Slika 36. Utjecaj smičnog napreznja na ribe [12]

- Udar lopaticom:
 - Primarni mehanizam ozljede i mortaliteta riba kod mnogih hidro projekta.
 - Vjerojatnost udara ovisi o razmaku između lopatica, brzini rotacije, relativnoj brzini ribe u odnosu na lopaticu, i duljini ribe.
 - Nedavna istraživanja su demonstrirala da preživljavanje udara lopatice može biti veće od 90% pri udarima brzine do 12 m/s.



Slika 37. Slika 35. Posljedice udara lopaticom [12]

- Na preživljavanje udara lopatice utječu:
 - Oblik lopatice
 - Debljina lopatice
 - Brzina pri kojoj dolazi do udara
 - Duljuna ribe
- Numerički model je korišten za ocjenu utjecaja oblika ruba lopatice na oštećivanje i mortalitet riba. Došlo je se do zaključka da je polukružni oblik najbolji za smanjenje mortaliteta riba. [12]

9. ZAKLJUČAK

Kako se čovječanstvo sve više okreće ekološki prihvatljivim izvorima energije, te kako se smanjuje mogućnost širenja etabliranih obnovljivih izvora (vjetar, solarna energija, hidroenergija), tako bi sve više mogla rasti potražnja upravo za ovim načinom dobivanja električne energije. Male kinetičke hidro elektrane uz to što su ekološki prihvatljive i nisu im potrebne brane u svojoj vertikalnoj izvedbi imaju relativno jednostavnu konstrukciju.

Trenutačno se ova tehnologija razvija u smjeru da se turbine namjenjene za rad u rijekama dizajniraju u rasponu od nekoliko kW pa do nekoliko stotina kW, dok se turbine koje koriste energiju morskih mijena dizajniraju za veće kapacite (nekoliko MW). Horizontalne turbine češće se koriste za proizvodnju električne energije iz energije morskih mijena, dok se verikalna izvedba češće koristi u riječnim tokovima. Cijena kinetičkih turbina i dalje je relativno visoka, ali bi trebala s razvojem ove tehnologije početi sve više padati, kao što se dogodilo s ostlim obnovljivim izvorima energije. S razvojem tehnologije i padom cijene ova vrsta turina bi trebala postići sve konkurentnija ostalim obnovljivim izvorima energije.

Kako je u ovome radu izabrana rijeka Drava kao lokacija na koju bi se instalirala kinetička vodna trbina, a uzimajući u obzir relativno malu brzinu toka Drave, odabrana je Darrieusove turbine. Darrieusove turbine mogu imati veći pomjer u odnosu na visinu svoga rotora što omogućuje da veća površina lopaitica bude oplahivana vodom ako se turbina nalazi u plićim riječnim tokovima te se tako može proizvesti više električne energije

LITERATURA

- [1] Guney, M. S., Kaygusuz, K.: Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review, 2010.
- [2] Sornes, K.: Small-scale water current turbines for river applications, 2010.
- [3] Haydar, F. H., El-Shafie, A., Karim, O. A.: Tidal current turbines glance at the past and look into future prospects in Malaysia, 2012.
- [4] Verdant Power Canada ULC, Technology Evaluation of Existing and Emerging Technologies Water Current Turbines for River Applications, 2006
- [5]
- [6] Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., Quaiocoe, J.E., Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review, 2009
- [7] Yaakob, O., Ahmed, Y. M., M. Ismail, A., Validation Study for Savonius Vertical Axis Marine Current Turbine Using CFD Simulation, 2012
- [8] Guney, M. S., Evaluation and measures to increase performance coefficient of hydrokinetic turbines, 2011
- [9] Halusek, H., Šljivac, D., Jozsa, L., Exploitation of the hydrokinetic potential of rivers by combining the traditional water wheel and the Darrieus turbine, 2012
- [10] Schleicher, W. C., Riglin, J. D., Kraybill, J. A., Oztekin A., Design and simulation of a micro hydrokinetic turbine, 2013
- [11] Sale, D., Hydrodynamic Optimization Method and Design Code for Stall-Regulated Hydrokinetic Turbine Rotors, 2009
- [12] Amaral, S., Allen, G., Hecker, G., Effects Of Hydrokinetic Turbines On Aquatic Life: turbine passage and fish behavior
- [13] <http://www.althydrosolutions.com>
- [14] Gosselin, R., Dumas, G., Boudreau, M., Parametric study of H-Darrieus vertical-axis turbines using uRANS simulations, 2013

PRILOZI

I. CD-R disc